

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mario Barunica

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Mario Barunica

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Damiru Godecu na stručnom vođenju kroz izradu završnoga rada te na pruženoj pomoći i korisnim savjetima za oblikovanje rada.

Također zahvaljujem svima s Katedre za preradbu polimera i drva na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Konačno, posebno zahvaljujem svojoj obitelji i svojoj djevojci na potpori i razumijevanju u razdoblju izrade završnoga rada, kao i na potpori tijekom samog studiranja.

Mario Barunica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARIO BARUNICA**

Mat. br.: 0035170024

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA INJEKCIJSKI
PREŠANIH ISPITNIH TIJELA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**TESTING OF MECHANICAL PROPERTIES OF INJECTION
MOULDED TESTING SPECIMENS**

Opis zadatka:

Injekcijsko prešanje polimera dinamički je proces prerade karakteriziran velikim brojem parametara, koji utječu međusobno jedni na druge, ali i na svojstva gotovih polimernih otpresaka. Stoga je za optimalno vođenje procesa injekcijskog prešanja potrebno poznavati utjecaje najvažnijih parametara injekcijskog prešanja na najvažnija svojstva otpresaka. Kako bi se pri utvrđivanju zakonitosti prema kojima parametri injekcijskog prešanja utječu na otpreske uklonio dodatni utjecaj geometrije otpresaka, za analizu se najčešće rabe standardizirani kalupi za izradu ispitnih tijela injekcijskim prešanjem.

U okviru završnog rada potrebno je načiniti teorijski pregled najvažnijih parametara injekcijskog prešanja, te na temelju dostupne literature izdvojiti skupinu parametara koji imaju najveći utjecaj na mehanička svojstva otpresaka. Na temelju tih zaključaka potrebno je načiniti odgovarajući plan pokusa te ga provesti s pomoću standardiziranih kalupa na primjeru jednog amorfnog i jednog kristalastog plastomera. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je načiniti analizu utjecaja izabranih parametara prerade na ključna mehanička svojstva, te komentirati eventualne razlike u rezultatima pri preradi različitih vrsta plastomera.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Damir Godec

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
SAŽETAK.....	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS SLIKA	VI
POPIS TABLICA.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. INJEKCIJSKO PREŠANJE.....	2
2.1. DEFINICIJA I POSTUPCI INJEKCIJSKOG PREŠANJA	2
2.2. LINIJA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE	3
2.3. INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA.....	3
2.4. UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESKA	6
2.5. DIMENZIJSKA STABILNOST OTPRESKA.....	8
3. POSTUPCI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA	9
3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESKA	9
3.2. POSTUPCI ISPITIVANJA	13
3.2.1. KRATKOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA	13
3.2.2. DUGOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA	18
4. ISPITNO TIJELO	21
5. EKSPERIMENTALNI DIO	24
5.1. CILJ ISTRAŽIVANJA.....	24
5.2. ISPITNI MATERIJAL I OPREMA	24
5.2.1. ISPITNI MATERIJAL.....	24
5.2.2. OPREMA	26
5.3. CENTRALNO-KOMPOZITNI PLAN POKUSA	31
5.4. PRETPOKUS – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	33
5.4.1. PROVEDBA PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	33
5.4.2. REZULTATI PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA	34
5.5. POKUS – UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA.....	35

5.5.1.	PROVEDBA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA	35
5.5.2.	REZULTATI POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA	36
5.5.3.	UTJECAJ NA MASU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS	39
5.5.4.	UTJECAJ NA MASU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP	40
5.5.5.	UTJECAJ NA TVRDOĆU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS.....	42
5.5.6.	UTJECAJ NA TVRDOĆU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP.....	43
5.5.7.	UTJECAJ NA ŠIRINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS	44
5.5.8.	UTJECAJ NA ŠIRINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP	46
5.5.9.	UTJECAJ NA DULJINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS	47
5.5.10.	UTJECAJ NA DULJINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP	49
5.5.11.	UTJECAJ NA ŠIRINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS.....	50
5.5.12.	UTJECAJ NA ŠIRINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP.....	52
5.5.13.	UTJECAJ NA DULJINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS	53
5.5.14.	UTJECAJ NA DULJINU NAKON 48 h – ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP	55
5.6.	RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA.....	56
6.	ZAKLJUČAK.....	58
7.	LITERATURA	59
8.	PRILOZI	61

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je “Ispitivanje mehaničkih svojstava injekcijski prešanih ispitnih tijela”. U sklopu rada bilo je potrebno detaljno razraditi proces injekcijskog prešanja te njegove najvažnije parametre, kako u teoriji tako i u praksi.

U prvom dijelu rada opisan je teorijski dio injekcijskog prešanja, postupci ispitivanja mehaničkih svojstava, i to kratkotrajna i dugotrajna ispitivanja mehaničkih svojstava. Zatim je opisano ispitno tijelo prema ISO normama.

Drugi dio temelji se na praktičnom dijelu, odnosno na ispitivanju utjecaja određenih parametara injekcijskog prešanja na osnovna mehanička svojstva ispitnih tijela u praksi. Za potrebe rada korištena je injekcijska ubrizgavalica proizvođača *Arburg* i temperiralo proizvođača *Regloplas*. Korišteni amorfn polimerni materijal je ABS (akrilonitril/butadien/stiren), a kristalasti PP (polipropilen). Kao medij za temperiranje korišteno je ulje.

Na kraju, računalnom analizom dobio se prikaz ovisnosti osnovnih mehaničkih svojstava (masa, tvrdoća i dimenzije) o temperaturi medija za temperiranje i vremenu naknadnog tlaka.

Ključne riječi: *injekcijsko prešanje, mehanička svojstva, utjecaj parametara injekcijskog prešanja, postupci ispitivanja*

POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Opis</u>
A	mm ²	površina
b	mm	širina
b ₁	mm	širina uskog dijela
b ₂	mm	širina pri kraju
E	N/mm ²	modul elastičnosti
E _p	N/mm ²	modul pritiskosti
E _r	N/mm ²	rastezni modul elastičnosti
F	-	broj faktorskih stanja
F _r	N	sila na granici razvlačenja
G	N/mm ²	modul smičnosti
h	mm	visina
H ₀	-	rizik odbacivanja hipoteze
k	-	broj promatranih faktora
L	mm	duljina
L ₀	mm	mjerna duljina
l ₀	mm	početna duljina
l ₁	mm	duljina uskog paralelnog dijela
l ₂	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela
l ₃	mm	ukupna duljina
log N	-	broj promjena
N	-	broj ukupnih stanja pokusa
r	mm	polumjer
r ₁	mm	mali polumjer
r ₂	mm	veliki polumjer
R _m	N/mm ²	rastezna (vlačna) čvrstoća
R _p	N/mm ²	prekidna čvrstoća
R _r	N/mm ²	granica razvlačenja
t	s	vrijeme
T ₀	°C	temperatura okoline
T _{PK}	°C	povišena temperatura kalupa
α	-	osna udaljenost
δ	N/mm ²	dinamička izdržljivost
ΔF	N	promjena sile
ΔK	N/mm ²	modul stlačivosti
Δl	mm	produljenje
ε	%	istezanje
ε _k	%	konačno istezanje
ε _p	%	prekidno istezanje
ε _u	%	ukupno istezanje
σ _p	N/mm ²	pritisno naprezanje
σ _r	N/mm ²	rastežno naprezanje
σ _s	N/mm ²	svojno naprezanje
σ _t	N/mm ²	tlačno naprezanje
τ _s	N/mm ²	smično naprezanje
τ _t	N/mm ²	uvojno (torzijsko) naprezanje

POPIS KRATICA

Kratika**Opis**

ABS	akrilonitril/butadien/stiren
ANOVA	analiza varijance
ISO	internacionalna organizacija za standardizaciju
PA	poliamid
PE	polietilen
PE-LD	polietilen niske gustoće
PMMA	poli(metil-metakrilat)
PP	polipropilen
PS	polistiren

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Modelni prikaz sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina.....	4
Slika 2.2. Sustav za injekcijsko prešanje pločastog otpreska.....	5
Slika 2.3. Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe.....	7
Slika 3.1. Napetosti u pločastom otpresku.....	10
Slika 3.2. Karakteristični dijagrami <i>rastezno naprezanje-istezanje</i> osnovnih skupina polimernih materijala.....	14
Slika 3.3. Raščlanjeni dijagram <i>rastezno naprezanje-istezanje</i> kristalastih plastomera	14
Slika 3.4. Vrste opterećenja tijela.....	15
Slika 3.5. Opći dijagram <i>naprezanje-deformacija</i>	15
Slika 3.6. Vrste krivulja pri ispitivanju rastezanjem	16
Slika 3.7. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala.....	17
Slika 3.8. Temeljni prikaz ponašanja polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju (krivulje puzanja i relaksacije polimernih materijala).....	18
Slika 3.9. Prikaz ponašanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju	18
Slika 3.10. Izokroni dijagram <i>naprezanje-istezanje</i>	19
Slika 4.1. Oblik ispitnog tijela.....	21
Slika 4.2. Specijalni oblik ispitnog tijela.....	22
Slika 5.1. Ispitna tijela prema ISO normama	24
Slika 5.2. Akrilonitril/butadien/stiren (ABS)	24
Slika 5.3. Polipropilen (PP).....	25
Slika 5.4. Temperiralo proizvođača <i>Regloplas</i>	26
Slika 5.5. Ubrizgavalica proizvođača <i>Arburg</i> , model <i>Allrounder 320D 850-210</i>	27
Slika 5.6. Digitalna pomična mjerka proizvođača <i>Micromaster</i>	28
Slika 5.7. Pomična mjerka proizvođača <i>Somet</i>	28
Slika 5.8. Digitalna vaga proizvođača <i>Kern&Sohn</i>	29
Slika 5.9. Pomičan dio kalupa.....	29
Slika 5.10. Nepomičan dio kalupa	30
Slika 5.11. Uređaj za mjerenje tvrdoće po <i>Shoreu</i>	30
Slika 5.12. Model pokusa: centralno-kompozitni plan pokusa s 3 faktora	31
Slika 5.13. Model pokusa: potpuni faktorski plan pokusa 3^k	32
Slika 5.14. Rezultati pretpokusa za ABS	34
Slika 5.15. Rezultati pretpokusa za PP.....	35
Slika 5.16. Prikaz ovisnosti mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	39
Slika 5.17. Prikaz ovisnosti mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	41
Slika 5.18. Prikaz ovisnosti tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	42
Slika 5.19. Prikaz ovisnosti tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	44
Slika 5.20. Prikaz ovisnosti širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	45
Slika 5.21. Prikaz ovisnosti širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	47
Slika 5.22. Prikaz ovisnosti duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	48

Slika 5.23. Prikaz ovisnosti duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	50
Slika 5.24. Prikaz ovisnosti širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	51
Slika 5.25. Prikaz ovisnosti širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	53
Slika 5.26. Prikaz ovisnosti duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a.....	54
Slika 5.27. Prikaz ovisnosti duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska	8
Tablica 3.1. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska.....	12
Tablica 3.2. Pregled mehaničkih svojstava	13
Tablica 4.1. Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B.....	21
Tablica 4.2. Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB	22
Tablica 4.3. Dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B.....	23
Tablica 5.1. Svojstva ABS-a	25
Tablica 5.2. Svojstva PP-a.....	26
Tablica 5.3. Tehnički podaci ubrizgavalice proizvođača <i>Arburg</i> , model <i>Allrounder 320D</i> 850-210.....	27
Tablica 5.4. Vrijednosti osne udaljenosti α	32
Tablica 5.5. Konstantni uvjeti preradbe pretpokusa.....	34
Tablica 5.6. Faktori i njihove razine.....	36
Tablica 5.7. Srednje vrijednosti rezultata pokusa za materijal ABS	37
Tablica 5.8. Srednje vrijednosti rezultata pokusa za materijal PP	38
Tablica 5.9. Rezultati analize varijance – masa, ABS.....	39
Tablica 5.10. Pregled statističkih podataka o modelu – masa, ABS	40
Tablica 5.11. Rezultati analize varijance – masa, PP	40
Tablica 5.12. Pregled statističkih podataka o modelu – masa, PP	41
Tablica 5.13. Rezultati analize varijance – tvrdoća, ABS.....	42
Tablica 5.14. Pregled statističkih podataka o modelu – tvrdoća, ABS	43
Tablica 5.15. Rezultati analize varijance – tvrdoća, PP	43
Tablica 5.16. Pregled statističkih podataka o modelu – tvrdoća, PP	44
Tablica 5.17. Rezultati analize varijance – širina, ABS.....	45
Tablica 5.18. Pregled statističkih podataka o modelu – širina, ABS	45
Tablica 5.19. Rezultati analize varijance – širina, PP	46
Tablica 5.20. Pregled statističkih podataka o modelu – širina, PP.....	47
Tablica 5.21. Rezultati analize varijance – duljina, ABS.....	48
Tablica 5.22. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina, ABS	49
Tablica 5.23. Rezultati analize varijance – duljina, PP	49
Tablica 5.24. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina, PP	50
Tablica 5.25. Rezultati analize varijance – širina nakon 48 h, ABS	51
Tablica 5.26. Pregled statističkih podataka o modelu – širina nakon 48 h, ABS	52
Tablica 5.27. Rezultati analize varijance – širina nakon 48 h, PP	52
Tablica 5.28. Pregled statističkih podataka o modelu – širina nakon 48 h, PP.....	53
Tablica 5.29. Rezultati analize varijance – duljina nakon 48 h, ABS.....	54
Tablica 5.30. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina nakon 48 h, ABS	55
Tablica 5.31. Rezultati analize varijance – duljina nakon 48 h, PP	55
Tablica 5.32. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina nakon 48 h, PP.....	56
Tablica 8.1. Rezultati pretpokusa za ABS.....	61
Tablica 8.2. Rezultati pretpokusa za PP.....	62
Tablica 8.3. Vrijednosti dobivene pokusom za materijal ABS	63
Tablica 8.4. Vrijednosti dobivene pokusom za materijal PP	64

1. UVOD

U današnjem svijetu polimeri igraju veliku ulogu. Injekcijsko prešanje je vrlo važan postupak preradbe polimera. To je postupak brzog ubrizgavanja plastomerne taljevine u temperiranu kalupnu šupljinu i njezino skrućivanje u otpresak. Također, to je visoko automatiziran i dinamičan proces s velikim brojem parametara koji utječu na stvaranje otpreska i na njegova konačna svojstva. Kako bi se dobio otpresak prema zahtjevanim specifikacijama, bitno je poznavati kako točno utječu ti parametri.

Dva bitna parametra su temperatura medija za temperiranje te vrijeme naknadnog tlaka. Njihov utjecaj na neka osnovna svojstva, poput mase, tvrdoće i dimenzije otpreska, detaljno je obrađen u ovom radu. Također, promatrana je razlika utjecaja na dva strukturno različita polimera, amorfni i kristalasti plastomer. Uređaj zvan temperiralo omogućuje jednostavno reguliranje temperature medija, koji može biti voda ili ulje. Voda ima slabije mogućnosti zagrijavanja kalupa, stoga se za potrebe praktičnog dijela rada rabilo ulje. S druge strane, naknadni tlak omogućuje potpuno očvršćivanje ušća te upotpunjuje masu otpreska. No nakon određenog vremena naknadni tlak prestaje imati utjecaj na otpresak. Trenutak u kojem se to dogodi zove se maksimalno vrijeme naknadnog tlaka.

Injekcijsko prešanje ispitnih tijela prema ISO normama omogućuje uvid u utjecaj parametara injekcijskog prešanja na svojstva otpresaka. Rezultati se dobivaju normiranim postupcima ispitivanja otpresaka, a ona mogu biti kratkotrajna i dugotrajna, ovisno o tome koja svojstva otpreska se žele ispitati.

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja može se dati konačan zaključak o utjecaju pojedinog parametra na pojedina svojstva otpreska. Postoje razni računalni paketi koji omogućuju brzu i točnu analizu rezultata.

2. INJEKCIJSKO PREŠANJE [1]

Injekcijsko prešanje je najvažniji ciklički postupak preradbe polimera, a prema dostignutoj razini i najusavršeniji. Injekcijskim se prešanjem prerađuju svi polimeri: duromeri, elastomeri, elastoplastomeri, a posebno je proširena preradba plastomernih taljevina. Prema prerađenim je količinama injekcijsko prešanje polimera odmah iza ekstrudiranja. Istodobno, može se smatrati da je i tlačno lijevanje metala inačica injekcijskog prešanja (vrijedi i obrat). Injekcijskim se prešanjem danas prerađuju i keramičke smjese, kombinacije različitih materijala (npr. plastika, metal i keramika), pa i žive stanice.

Osnovno obilježje suvremene opreme za injekcijsko prešanje je visok stupanj automatiziranosti, posebno ubrizgavalica, te najsuvremenije vođenje procesa, najčešće temeljeno na mikroprocesorima i primjeni računala.

2.1. DEFINICIJA I POSTUPCI INJEKCIJSKOG PREŠANJA [1]

Injekcijsko prešanje polimera ciklički je postupak praoblikovanja ubrizgavanjem polimerne tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina, otpresak, postaje polireakcijom i/ili umreživanjem, geliranjem i/ili hlađenjem podobnom za vađenje iz kalupne šupljine.

Otpresci mogu biti različitih veličina, mase manje od miligrama do približno 180 kg. Injekcijsko prešanje prikladno je za proizvodnju vrlo kompliciranih otpresaka, visoke dimenzijske stabilnosti (tolerancije od nekoliko mikrometara). Zbog dostignutoga visokog stupnja automatiziranosti, moguća je neprekinuta proizvodnja dvadeset i četiri sata na dan, sedam dana u tjednu. Moguće je načiniti otpreske u više boja, kombinaciju krutoga i savitljivoga dijela otpreska (tvrdo-meko), integralne pjenaste tvorevine itd.

Injekcijski se mogu prešati niskoviskozne kapljevine (npr. epoksidne smjese ili smjese za proizvodnju integralnih poliuretanskih pjenastih tvorevina) ili polimerne taljevine (povišena smična viskoznost).

2.2. LINIJA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE [1]

Za postupak injekcijskog prešanja potrebna je preradbena linija koju čine sustav za injekcijsko prešanje i dopunska oprema. Dopunska oprema povisuje djelotvornost procesa, a sastoji se od elemenata rukovanja tvarima i/ili materijalom i proizvodom (oprema za transport).

Svaki sustav za injekcijsko prešanje mora ispunjavati ove funkcije: priprema tvari potrebne smične viskoznosti, ubrizgavanje i stvaranje praoblaka tvorevine pri propisanoj temperaturi kalupne šupljine. Pri preradbi polimernih materijala (plastomerne taljevine i elastoplastomeri) dolazi samo do promjene stanja materijala, čvrsto – kapljevito – čvrsto, što se ostvaruje geliranjem i/ili hlađenjem. Pri preradbi plastomernih monomera, duromernih tvari i kaučukovih smjesa, očvršćivanje tvari u potreban geometrijski oblik otpreska povezano je s kemijskim reakcijama polimeriziranja i/ili umreživanja. Pri injekcijskom prešanju metalnih čestica i keramičkih smjesa, iz kalupa se vadi *zeleni* otpresak, *zelenac*. Zatim slijedi uklanjanje polimernog veziva i očvršćivanje sraščivanjem.

Sustav za injekcijsko prešanje moguće je okarakterizirati kao dinamički, kontinuiran i nelinearan, stohastički, stabilan, s povratnim vezama. Istodobno je riječ o fleksibilnom, kompliciranom i kompleksnom sustavu.

2.3. INJEKCIJSKO PREŠANJE PLASTOMERNIH TALJEVINA [2]

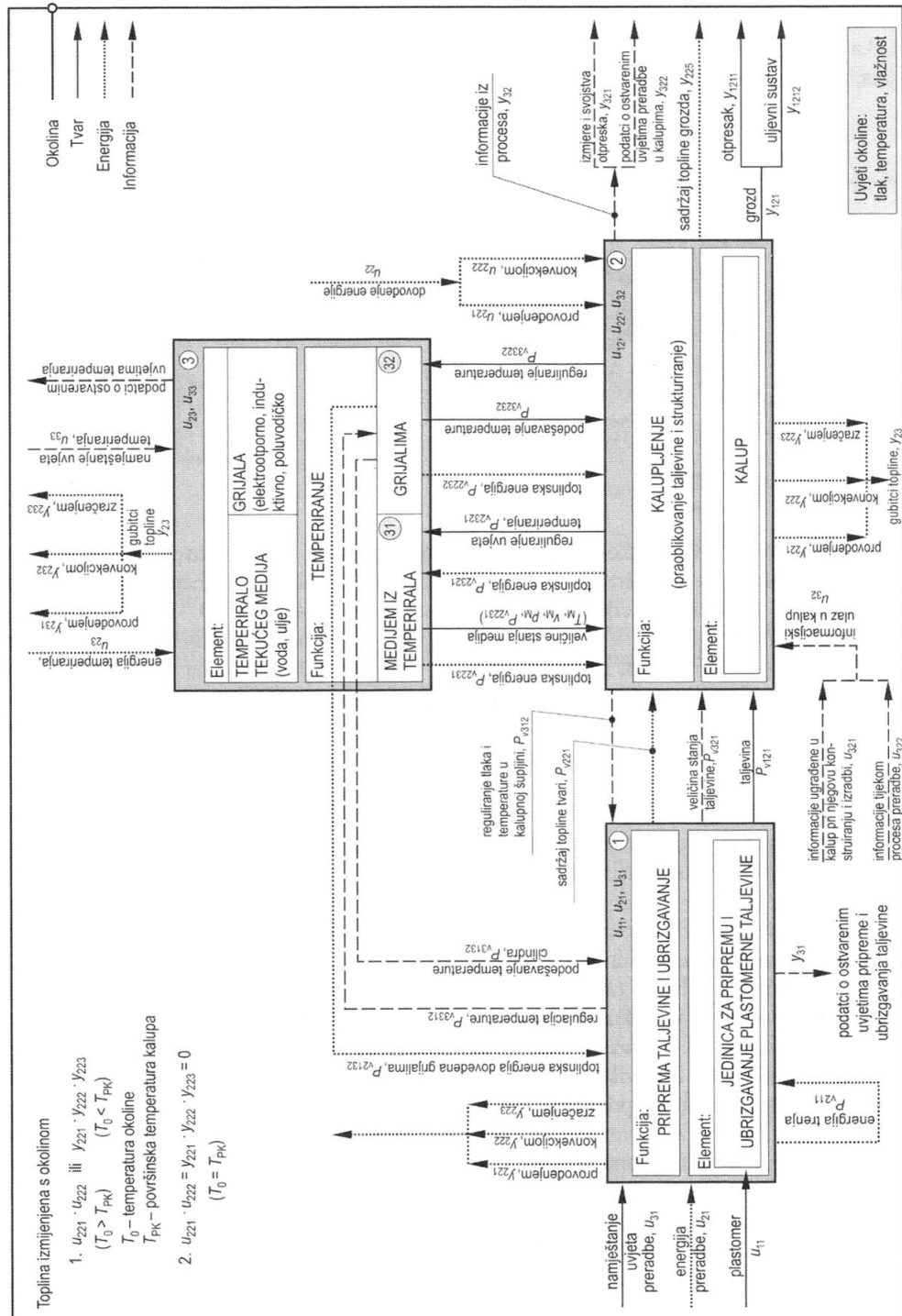
Sustav potreban za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina, koji čine ubrizgavalica, kalup i temperiralo kalupa, može se prikazati modelom. Pojednostavnjeni model sustava za injekcijsko prešanje plastomera koji sadržava materijale, energijske i informacijske ulaze i izlaze te veze među elementima prikazan je na slici 2.1. Važni su i utjecaj okoline, temperatura, vlažnost (sušenje polimera) i tlak okolišnjeg zraka.

Ubrizgavalica se sastoji od četiri jedinice: jedinice za pripremu i ubrizgavanje taljevine, zatvaranje kalupa, pogonske jedinice i jedinice za vođenje (upravljenje i reguliranje) te zaštitnih uređaja.

Ubrizgavalice imaju samo jedan pužni vijak. Njegova je duljina obično 12 do 20, u novije vrijeme i više duljina promjera, koji može biti između 10 i 200 mm. Pužni se vijak potiskuje

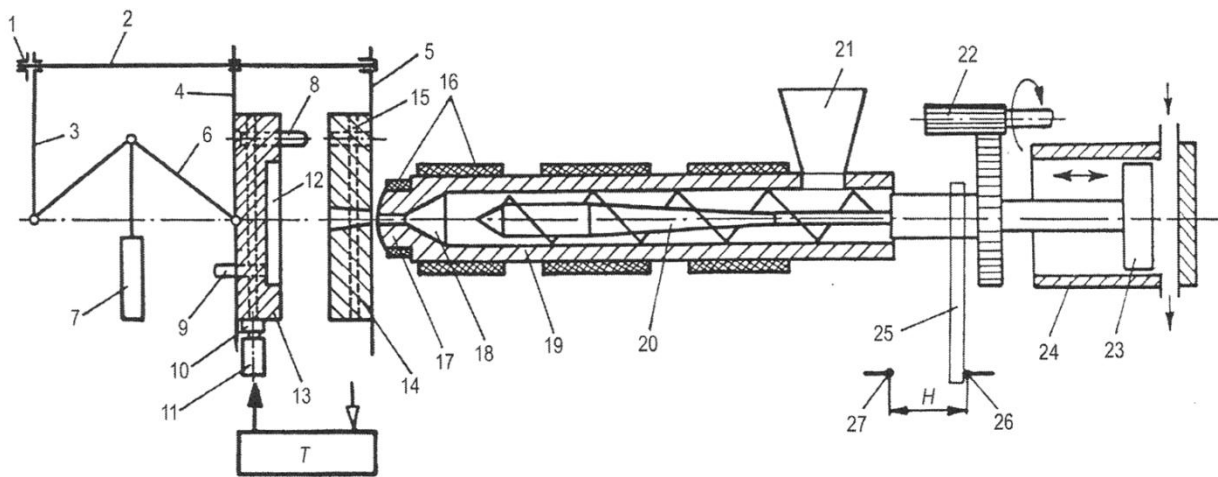
prema naprijed hidraulički pa se taljevina ubrizgava u kalup brzinom 1,5 m/s i pod visokim pritiskom obično do 200 N/mm². Temperature taljevine obično su 150 do 425 °C, a stijenke kalupne šupljine -5 do 260 °C.

Najveća ubrizgavalica može odjednom ubrizgati 175 litara taljevine.



Slika 2.1. Modelni prikaz sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina [2]

Nekad je osnovno načelo ubrizgavanja bilo ubrizgavanje klipom, a danas je to ubrizgavanje pužnim vijkom (slika 2.2). Materijal ulazi kroz lijevak u zagrijani cilindar za taljenje, gdje ga zahvaća pužni vijak. Materijal se tali i skuplja pri vrhu pužnog vijka. Kad se skupi dovoljno rastaljenog materijala, pužni se vijak pomiče prema naprijed i ubrizgava taljevinu kroz mlaznicu i uljevni sustav u kalup. U početku hlađenja materijal se steže pa se taljevina i dalje drži pod naknadnim pritiskom (obično niži od pritiska ubrizgavanja). Poslije se pužni vijak vraća u početni položaj i priprema novu količinu materijala, a otpresak se u kalupu i dalje hladi, kalup se otvara i izradak se može izvaditi.



Slika 2.2. Sustav za injekcijsko prešanje pločastog otpreska: 1 – matica za namještanje visine kalupa, 2 – priječnica, 3 – uporišna ploča, 4 – pomični nosač kalupa, 5 – nepomični nosač kalupa, 6 – kutne poluge, 7 – hidraulički cilindar, 8 – vodeći zatik, 9 – izbacivalo, 10 – priključak, 11 – gipka cijev, 12 – kalupna šupljina, 13 – pomični dio kalupa, 14 – nepomični dio kalupa, 15 – kanal za temperiranje, 16 – pojasno grijalo, 17 – mlaznica, 18 – sabirnica, 19 – cilindar za taljenje, 20 – pužni vijak, 21 – lijevak, 22 – pogonski mehanizam pužnog vijka, 23 – hidraulički stap, 24 – cilindar za ubrizgavanje, 25 – pokretački slog – uklopni palac, 26 – stražnja krajnja sklopka, 27 – prednja krajnja sklopka; H – hod pužnog vijka, T – temperiralo [2]

Cilindar za taljenje završava mlaznicom, na koju se nastavlja kalup sa svojim uljevnim sustavom, kućištem, kalupnom šupljinom i mehanizmom za izbacivanje otpreska. Kućište se sastoji od sloga ploča kao nosive konstrukcije kalupa.

Uljevni sustav povezuje cilindar za taljenje s pomoću uljavnog tuljca, kanala i ušća s kalupnom šupljinom. Proračun i dimenzioniranje uljavnog sustava vrlo su važni za uspješan tijek procesa. Posebno su bitni oblik i veličina ušća (suženja uljavnog kanala na ulazu u kalupnu šupljinu). Oblik ušća odabire se prema vrsti i obliku otpreska pa ono može biti točkasto, plosnato, kružno,

prstenasto, vrlo tanko (tzv. filmsko) itd. Zadaća je ušća da sprječava povrat taljevine za vrijeme vraćanja pužnog vijka u početni položaj i suviše veliko stlačivanje taljevine tijekom naknadnog tlačenja i omogućavanje lakog odvajanja otpreska.

Dijelovi kalupa koji omeđuju kalupnu šupljinu fino su polirani, a izrađuju se od čelika, bronce, mjedi i nekih drugih metala i polimera. Od čelika to su obično nehrđajući prokaljivi čelici visoke tvrdoće ili žilavosti, poboljšani čelici ili čelici visoke površinske tvrdoće (čelici za cementiranje i nitiranje).

Kalup se sastoji od dva dijela, od kojih je jedan pomičan, pa se mogu rastaviti i spojiti. Nepomičan dio kalupa povezan je uljevnim sustavom s cilindrom za taljenje, a pomičan dio otvara i zatvara kalupnu šupljinu i može se pritom precizno centrirati elementima sustava za vođenje. U njega je ugrađen i uređaj za izbacivanje otpreska. Najčešće je to mehanički uređaj, ali se otpresci katkad izbacuju i tlakom zraka ili ulja.

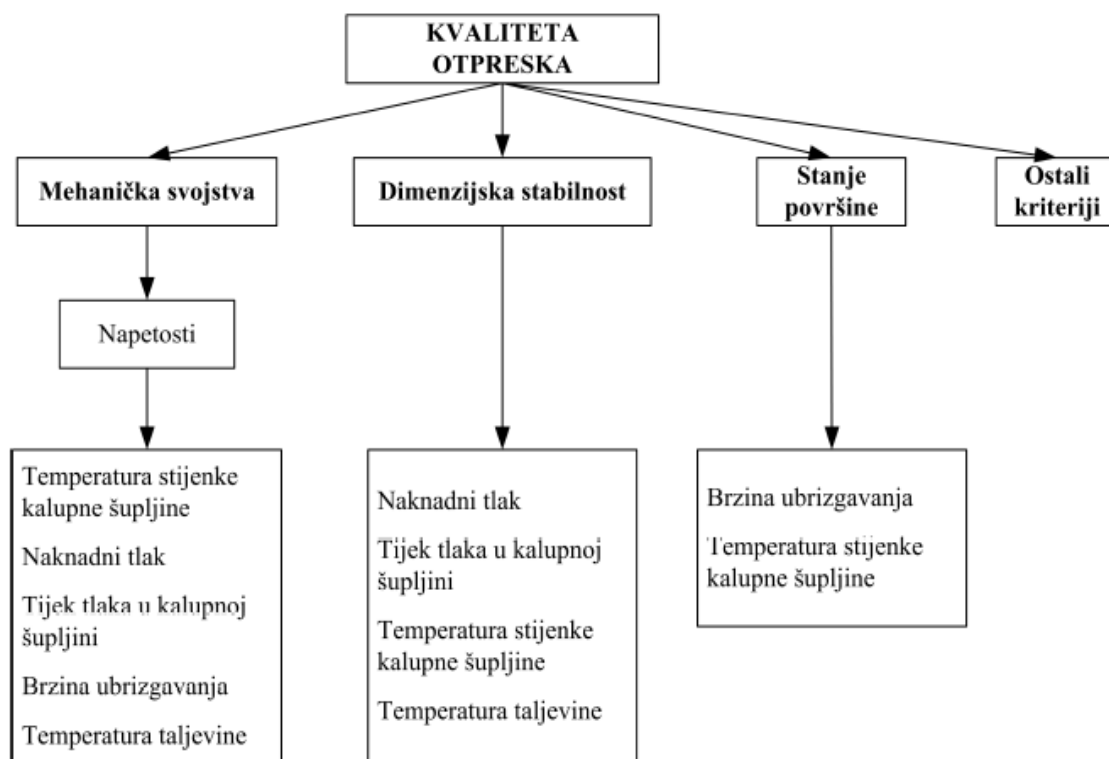
Prema vrsti plastomera koji se prerađuju injekcijskim prešanjem, kalup treba održavati pri nekoj određenoj temperaturi (temperiranje kalupa), a katkad i jače zagrijavati ili hladiti. Tako su tijekom preradbe konstrukcijskih plastomera potrebne visoke temperature kalupa, dok se u proizvodnji vrlo tanke ambalaže kalup mora hladiti rashladnim strojevima. Naprikladniji medij za temperiranje kalupa jest voda u otvorenim ili zatvorenim temperiranim, kojoj se po potrebi dodaju sredstva za sniženje ledišta ili povišenje vrelišta. To je najčešće etilenglikol, koji omogućuje da se voda upotrebljava i do temperature 140 °C.

2.4. UTJECAJ PARAMETARA INJEKCIJSKOG PREŠANJA NA SVOJSTVA OTPRESKA

Svi elementi sustava za injekcijsko prešanje utječu na kvalitetu otpreska te međusobno. Stoga samo optimalno sastavljen sustav za injekcijsko prešanje plastomera uz optimalno podešene uvjete preradbe može rezultirati proizvodnjom dimenzijski stabilnih otpresaka optimalne kvalitete uz minimalno trajanje ciklusa. Pri optimalnom vođenju procesa injekcijskog prešanja cilj je uz minimalni utrošak vremena, energije i materijala proizvesti kvalitetan otpresak. Kako su konačne veličine (npr. kvaliteta otpreska, utrošak energije itd.) kao takve nemjerljive, treba ih dovesti u korelaciju s lako mjerljivim veličinama procesa (npr. brzina ubrizgavanja, temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine, tlak ubrizgavanja itd.). [3,4]

Kvalitetu otpreska moguće je podijeliti u 5 skupina: stanje površine otpreska, dimenzijska stabilnost, mehanička svojstva, unutrašnja svojstva, ostala svojstva. [3,4]

Povezanost pojedinih parametara procesa injekcijskog prešanja s kvalitetom otpreska prikazuje slika 2.3 iz koje je vidljivo kako je kvaliteta otpreska očito funkcija prošlosti procesa, a ona je rezultat parametara preradbe. [3,5]



Slika 2.3. Kvaliteta otpreska u ovisnosti o parametrima preradbe [3,5]

Prethodna istraživanja su ukazala kako su pri klasičnom injekcijskom prešanju najutjecajniji parametri na kvalitetu otpreska: [6]

- temperatura stijenke kalupne šupljine
- tlak u kalupnoj šupljini
- temperatura taljevine
- brzina (vrijeme) ubrizgavanja.

Analiza temperature stijenke kalupne šupljine i tlaka u kalupnoj šupljini te njihova korelacija s konačnim veličinama pokazali su kako se mjerenjem tih termodinamičkih veličina stanja može najbolje opisati događaje u procesu te se dobiti najviše informacija o kvaliteti otpreska. [3,7]

2.5. DIMENZIJSKA STABILNOST OTPRESKA

Svi do sada spomenuti parametri preradbe imaju izravan ili posredan utjecaj na izmjere otpreska. Pri tome prevladava utjecaj naknadnog tlaka i vremena njegovog djelovanja (tablica 2.1). To znači kako je za definiranje dimenzijske stabilnosti otpreska najvažnija faza djelovanja naknadnog tlaka u ciklusu injekcijskog prešanja. [8]

Tablica 2.1. Utjecaj parametara injekcijskog prešanja na izmjere otpreska [8]

Parametar	Utjecaj	Izmjere otpreska
Povišenje temperature taljevine	- povećanje obujma	↓
Povišenje temperature stijenke kalupne šupljine	- viša temperatura otvaranja kalupa	↓
Povišenje brzine ubrizgavanja	- bolji prijenos naknadnog tlaka u kalupnu šupljinu	↑
Povišenje naknadnog tlaka	- bolja kompenzacija stezanja, bolje stlačivanje taljevine	↑
Produljenje vremena djelovanja naknadnog tlaka	- isto kao i prethodno (prije pečačenja ušća) - nakon pečačenja ušća	↑ -
Povećanje deformacija kalupa uslijed tlaka u kalupnoj šupljini	- disanjem kalupa omogućuje se bolje djelovanje naknadnog tlaka	↑
Povećanje presjeka ušća	- posredni utjecaj (ovisno o brzini ubrizgavanja, naknadnom tlaku i temperaturi taljevine)	↑

3. POSTUPCI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Znanje o svojstvima materijala neophodno je iz više razloga: konstruiranja, kontrole kvalitete, analize loma te radi razumijevanja strukture i ponašanja novih materijala. Specifične ispitne procedure razvijaju se za svaki razred materijala. Ove procedure su općenito one koje najviše odgovaraju genetičkim karakteristikama razreda materijala te njihova upotreba pomaže doprinijeti najznačajnijim rezultatima i dopušta usporedbu podataka iz različitih izvora. Plastika nije nikakav izuzetak. [9]

3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA OTPRESKA

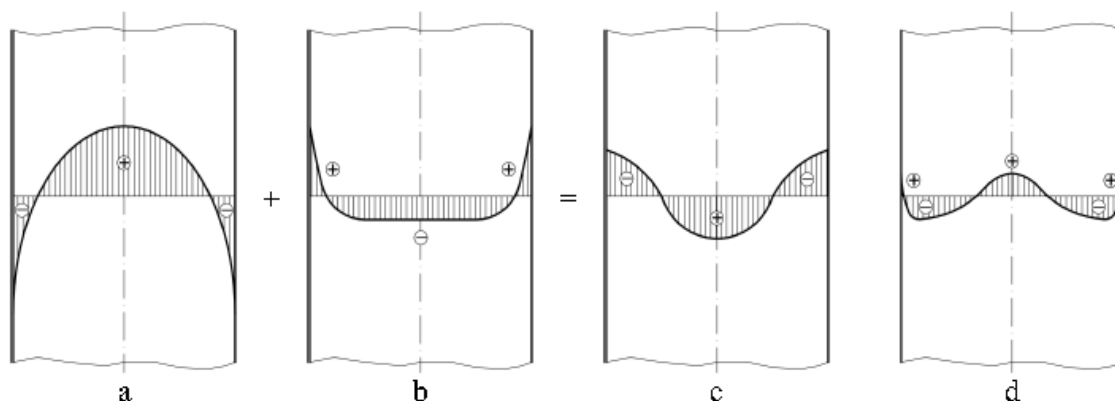
Mehanička svojstva otpreska ne ovise samo o kemijskoj strukturi plastomera, već na njih bitno utječu i parametri preradbe. Gotovo sva mehanička svojstva otpresaka načinjenih od istoga plastomernog materijala mogu se mijenjati promjenom parametara injekcijskog prešanja. Većina svojstava koja utječu na kvalitetu otpreska uglavnom su odraz unutrašnje strukture materijala otpreska. [8]

Najvažnije strukturne karakteristike plastomera koje su ovisne o parametrima preradbe su: orijentacija makromolekula, orijentacija punila i ojačavala (ukoliko su prisutna), zaostala naprezanja, kristalnost strukture i stupanj kristalnosti. [8]

Mehanička svojstva otpreska izravno su ovisna o stupnju i smjeru orijentacije molekula materijala otpreska. Općenito vrijedi pravilo kako su mehanička svojstva viša u smjeru tečenja, a niža u smjeru okomitom na smjer tečenja. Orijentiranost se smanjuje s povećanjem puta tečenja. U blizini ušća naknadni tlak može uzrokovati lagani porast stupnja orijentacije u središtu presjeka otpreska. Orijentacija uglavnom ovisi o temperaturi taljevine i profilu brzine čela taljevine. Orijentacija amorfних i kristalastih plastomera je različita. Veći iznosi stezanja javljaju se pri preradbi kristalastih plastomera, pa je nužno dodavanje veće količine taljevine tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka. Dodavanje taljevine povišuje stupanj orijentacije posebice kroz središte presjeka otpreska. Brzina čela taljevine također utječe na orijentaciju. Pri visokim brzinama ubrizgavanja ostvaruje se veći stupanj orijentacije. [10]

Zaostala naprezanja su mehanička naprezanja prisutna u otpresku bez djelovanja vanjskog opterećenja (slika 3.1). Ona su rezultat različitih temperaturnih profila u otpresku tijekom

hlađenja, što uzrokuje deformacije kutova atomskih veza u makromolekulama. Površinski sloj se brzo hladi i očvršćuje čineći krutu ljusku koja sputava stezanje još uvijek vrućih unutrašnjih slojeva tijekom njihova hlađenja. Takvo stanje rezultira rasteznim naprezanjima u unutrašnjosti otpreska te pritisknim naprezanjima na vanjskim dijelovima otpreska. Deformacije koje uzrokuju zaostala naprezanja uglavnom su energijsko-elastične prirode. [8,10,11]



Slika 3.1. Napetosti u pločastom otpresku: a - zbog uvjeta zagrijavanja ili hlađenja, b - zbog uvjeta tečenja, c - zbog djelovanja unutarnjeg tlaka, d - ukupne (superponirane) napetosti [11]

Zaostala naprezanja predstavljaju mehaničko predopterećenje otpresku i imaju bitan utjecaj na uporabljivost otpreska, dimenzijsku stabilnost, čvrstoću i kemijsku postojanost. [10,11]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ključan je parametar za pojavu zaostalih naprezanja u otpresku. Niže temperature stijenke kalupne šupljine pogoduju pojavi povišenih zaostalih naprezanja u otprescima. Vrijeme hlađenja bitno utječe na profil zaostalih naprezanja u otpresku. Skraćenje vremena hlađenja smanjuje razinu zaostalih naprezanja. Razlog djelomično leži u činjenici da otpresak što je više temperature pri vađenju iz kalupne šupljine, to mu je omogućena bolja relaksacija makromolekula. Drugi razlog je ranije vađenje otpreska iz kalupne šupljine koje rezultira bržim uravnoteženjem profila temperatura po presjeku otpreska, pa zaostala naprezanja nastaju uslijed manjih temperaturnih razlika. Debljina stijenke otpreska također bitno utječe na profil zaostalih naprezanja. Otpresci tanjih stijenki hlade se brže od debljih, pa se u njima razvijaju veći temperaturni gradijenti koji uzrokuju više vrijednosti zaostalih naprezanja. Deblji otpresci također omogućuju bolje uvjete za relaksaciju naprezanja. [10]

Vršna vrijednost tlaka tijekom stlačivanja i prekomjeran naknadni tlak u kalupnoj šupljini uzrokuju stlačivanje i preopterećenje u središnjem dijelu presjeka otpreska. U takvim slučajevima otpresak se vadi iz kalupne šupljine s povišenim tlakom u njegovoj unutrašnjosti. Takvo stanje dovodi do pojave *napetosti uslijed stlačivanja* u kalupu. [8]

Pri preradbi kristalastih plastomera postiže se sređenija struktura molekula na mikro razini. Takve skupine sređenih makromolekula nazivaju se kristalitima. Stupanj kristalnosti može se definirati kao omjer kristaliziranog materijala prema materijalu koji je bio sposoban kristalizirati. Stupanj kristalnosti definira nekoliko svojstava otpreska. Postoji izravna veza između stupnja kristalnosti i mase otpreska, rastezne čvrstoće, modula elastičnosti i žilavosti koji rastu proporcionalno s porastom stupnja kristalnosti. [10]

Stupanj kristalnosti ovisi prvenstveno o molekulnoj strukturi, no na njega je moguće utjecati i s pomoću parametara preradbe te naknadnom obradbom. Na stupanj kristalnosti najveći utjecaj ima temperatura stijenke kalupne šupljine. Viša temperatura stijenke kalupne šupljine pogoduje postizanju višeg stupnja kristalnosti. Viša brzina hlađenja uzrokuje postizanje manjeg stupnja kristalnosti. U tom je slučaju moguće očekivati naknadnu kristalizaciju koja ima utjecaj na svojstva otpreska i njegove izmjere. [10]

Debljina stijenke otpreska utječe na postizanje određenog stupnja kristalnosti. Kako se deblji otpresci hlade sporije, u njihovoj strukturi postiže se viši stupanj kristalnosti nego li u slučaju tankostjenih otpresaka. [10]

Tijekom faze ubrizgavanja najjači je utjecaj tlaka u kalupnoj šupljini na postizanje kvalitete površine otpreska, orijentiranost molekula, te postignuti stupanj kristalnosti. Ta faza ujedno definira i razinu toplinskih i mehaničkih opterećenja taljevine. Tijekom faze stlačivanja bitno se utječe na oblikovanje otpreska i poprimanje svih detalja kalupne šupljine. Tijekom te faze također je moguća pojava srha, te oštećenja kalupa. Faza djelovanja naknadnog tlaka usko je povezana s postizanjem odgovarajuće mase otpreska, kao i s odgovarajućom dimenzijskom stabilnošću otpreska. Tijekom te faze također se utječe na postizanje orijentacije strukture i na postignuti stupanj kristalnosti, ali u manjoj mjeri nego li tijekom ubrizgavanja. Moguće je zaključiti kako se u svim fazama ciklusa injekcijskog prešanja može utjecati na mehanička svojstva otpreska. [8]

Temperatura stijenke kalupne šupljine, ukupno gledajući, smatra se najutjecajnijim parametrom preradbe injekcijskim prešanjem na svojstva otpreska (tablica 3.1). [3]

Temperatura stijenke kalupne šupljine ovisi o toplinskim svojstvima materijala elemenata koji oblikuju kalupnu šupljinu i izmjerama kanala za temperiranje. Također je dinamička funkcija temperature taljevine, temperature okoline te temperature i brzine medija za temperiranje, kao i vremena hlađenja otpreska i vremena ciklusa injekcijskog prešanja. [3,5]

Tablica 3.1. Utjecaj temperature stijenke kalupne šupljine na neka svojstva otpreska [3]

Utjecajna veličina	Porast	Pad
• Temperatura stijenke kalupne šupljine	x	
<u>Zavisne veličine (svojstva otpreska)</u>		
• Napetosti		x
• Kristalnost	x	
• Naknadno skupljanje		x
• Toplinska postojanost	x	
• Orijentacija		x
• Vrijeme djelovanja naknadnog tlaka	x	
• Vrijeme pečenja ušća	x	
• Vrijeme hlađenja (ciklusa)	x	

Stohastičnost temperature stijenke kalupne šupljine očituje se u činjenici kako postoji samo stanovita vjerojatnost da se postignuta temperatura i zadrži u idućem ciklusu, što zahtijeva mjerenje temperature stijenke kalupne šupljine. Pokusi su pokazali kako se najbolji rezultati postižu ako se osjetilo temperature postavlja na površini ili neposredno ispod površine stijenke kalupne šupljine. [3,5]

Tlak u kalupnoj šupljini sljedeći je utjecajni čimbenik na svojstva otpreska. Ispravan tijek tlaka u kalupnoj šupljini i njegova kontrola tijekom preradbe postiže se mjerenjem i registriranjem. Stoga se u kalup ugrađuju osjetila tlaka. Tlak u kalupnoj šupljini moguće je mjeriti izravno ili posredno. [3,8,12]

3.2. POSTUPCI ISPITIVANJA [2]

Normizacija i jamstvo kvalitete materijala temelje se na brojnim metodama ispitivanja i karakterizacije materijala, te organizaciji informacijskih sustava o materijalima. Osim normiranih mjernih metoda za granična mehanička i toplinska svojstva, kemijsku i biološku postojanost itd., raspoložive su i brojne nerazorne metode ispitivanja strukture i svojstva materijala (spektroskopske metode itd.). Mnoge normirane metode ispitivanja zahtijevaju i normirana ispitna tijela, ispitke. Postupci proizvodnje i pripreme ispitaka ovise o brojnim utjecajnim čimbenicima, uključujući vrstu polimera i oblik u kojem je materijal dostupan. U slučaju krute plastike, ispitci se mogu načiniti injekcijskim prešanje. U tom se slučaju može pojaviti nehomogenost strukture i orijentiranost svojstva.

Pri konstrukcijskoj primjeni polimernih materijala posebno su zanimljiva mehanička svojstva. Ona se određuju brojnim statističkim i dinamičkim ispitivanjima. Kako bi se pri ispitivanjima uklonio utjecaj geometrije ispitivanog tijela, ispituju se epruvete (ispitno tijelo, ispitak) propisanog oblika. Većina normiranih ispitivanja mehaničkih svojstava izvodi se na univerzalnom ispitnom uređaju, tzv. kidalici. Jedan od mogućih načina podjele mehaničkih svojstava prikazan je u tablici 3.2.

Tablica 2.2. Pregled mehaničkih svojstava [2]

MEHANIČKA SVOJSTVA			
KRATKOTRAJNA SVOJSTVA		DUGOTRAJNA SVOJSTVA	
Udarno opterećenje	Statičko opterećenje	Statičko opterećenje	Dinamičko opterećenje
- žilavost	-čvrstoća - modul elastičnosti - tvrdoća	- statička izdržljivost (puzanje)	- dinamička izdržljivost (zamor materijala)

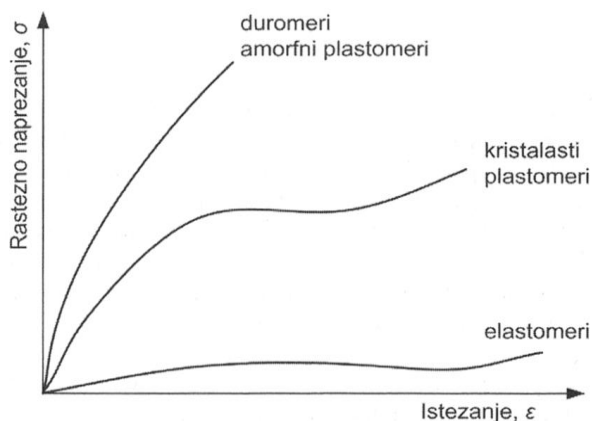
Podjela svojstava kao u tablici 3.2 načinjena je na temelju činjenica da su mehanička svojstva ovisna o utjecaju unutarnjih i vanjskih čimbenika, o trajanju opterećenja te o načinu i brzini djelovanja opterećenja.

3.2.1. KRATKOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA [2]

Kao kratkotrajno opterećenje definira se ono opterećenje pri kojem od početka ispitivanja (opterećivanja) pa do kraja ispitivanja (opterećivanja), odnosno loma ne prođe niti znatno više

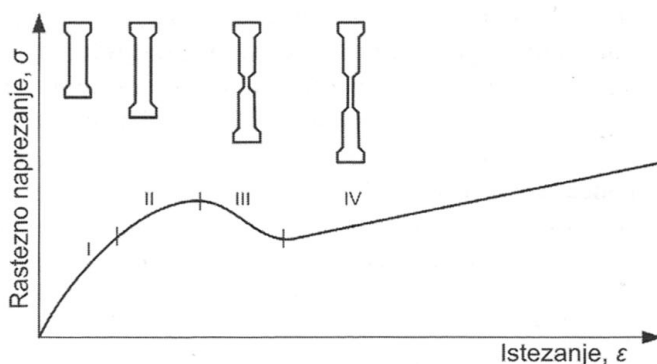
nit i znatno manje od jedne minute. Iz te definicije proizlazi ovisnost mehaničkih svojstava o trajanju opterećenja.

Budući da su za primjenu polimera mehanička svojstva vrlo važna, potrebno je najprije prikazati karakteristične dijagrame "naprezanje-deformacija" pri rasteznom (kratkotrajnom statičkom) opterećenju osnovnih skupina polimera (slika 3.2).



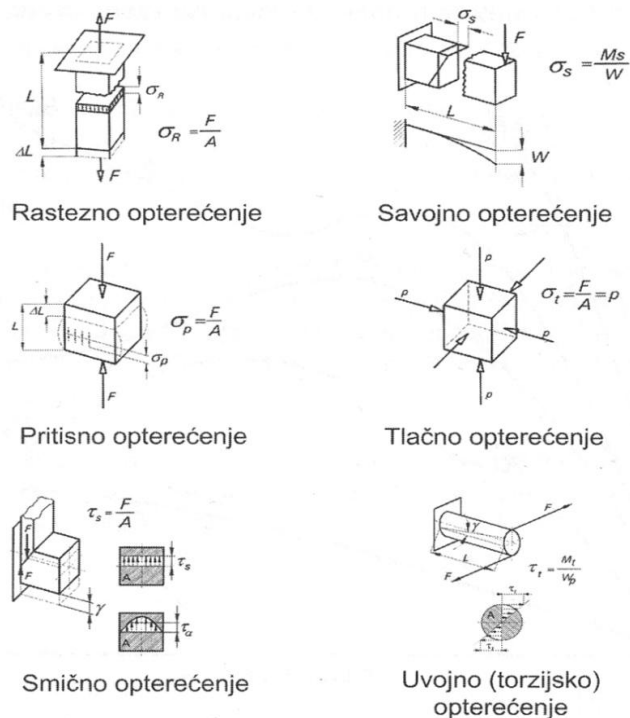
Slika 3.2. Karakteristični dijagrami *rastezno naprezanje-istezanje* osnovnih skupina polimernih materijala [2]

Karakteristično ponašanje polimernih materijala, osobito onih s lančastim (linearnim) makromolekulama zorno prikazuje raščlanjeni dijagram *rastezno naprezanje-istezanje* na slici 3.3.



Slika 3.3. Raščlanjeni dijagram *rastezno naprezanje-istezanje* kristalastih plastomera [2]

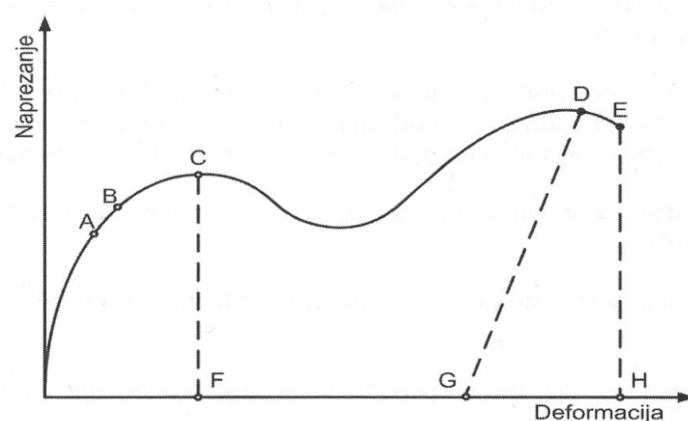
U praksi je najčešće ispitivanje rastezanjem i na njemu se temelje sve definicije čvrstoća i deformacija, ali su moguća i ostala opterećenja (slika 3.4)



Slika 3.4. Vrste opterećenja tijela [2]

Epruveta se upne u kidalici i mjeri se sila i produljenje pa se preračunavanjem sile na jedinicu ploštine presjeka određuju naprezanja:

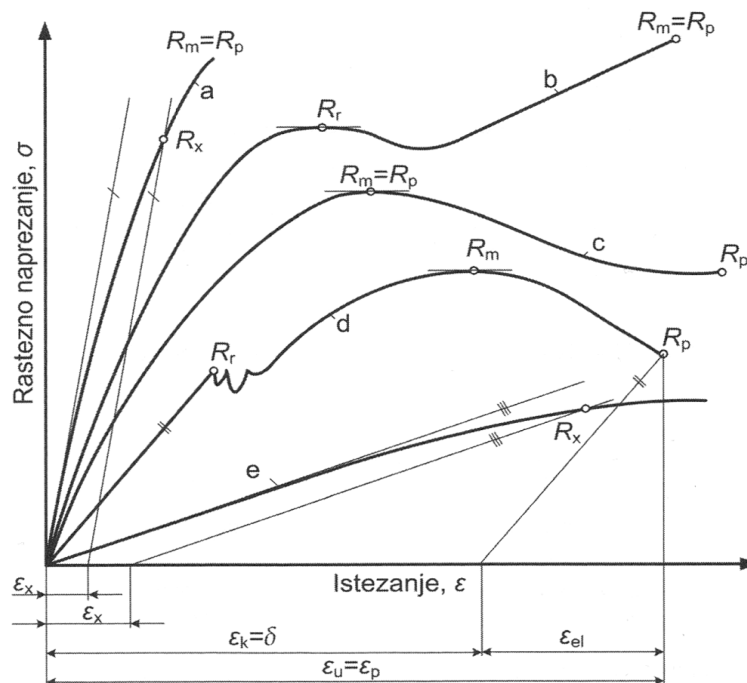
- granica razvlačenja (R_r)
- rastezna (vlačna) čvrstoća (R_m)
- prekidna čvrstoća (R_p).



Slika 3.5. Opći dijagram *naprezanje-deformacija*: A – granica proporcionalnosti, B – granica elastičnosti, C – granica tečenja, D – čvrstoća pri djelovanju maksimalnog opterećenja, E – nominalno naprezanje pri djelovanju sile koja razdvaja dijelove ispitka, F – deformacija pri granici tečenja, G – trajna deformacija po rasterećenju, H – ukupna deformacija [2]

U slučaju rasteznog opterećenja, u odnosu prema početnoj duljini određuje se prekidno (ukupno) istezanje (E_p).

Na slici 3.6 prikazano je nekoliko tipičnih oblika krivulja *rastezno naprezanje-istezanje* za različite materijale.



Slika 3.6. Vrste krivulja pri ispitivanju rastezanjem: a – sivi lijev ili PS, PMMA, UP, b – PE-LD, c – PA ili PE, d – niskougljični čelik, e – Al, Cu, PA [2]

Granica razvlačenja je naprezanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R = F/A$). Pri djelovanju sile na granici razvlačenja F_r , već i pri malom povećanju istezanja dolazi do smanjenja sile, a produljenje se neproporcionalno povećava. Ako je R_r istaknut, tangenta na krivulje usporedna je s apscisom.

Konvencionalna granica razvlačenja je naprezanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istezanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuju granicu razvlačenja. Dogovorena vrijednost trajnog istezanja kod polimera obično je 0,1 ili 1 % (metala 0,2 %).

Rastezna (vlačna) čvrstoća je naprezanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R_m = F_m/A_o$).

Prekidna čvrstoća je naprezanje što ga izaziva prekidna sila na početnu ploštinu presjeka epruvete ($R_p = F_p/A_o$).

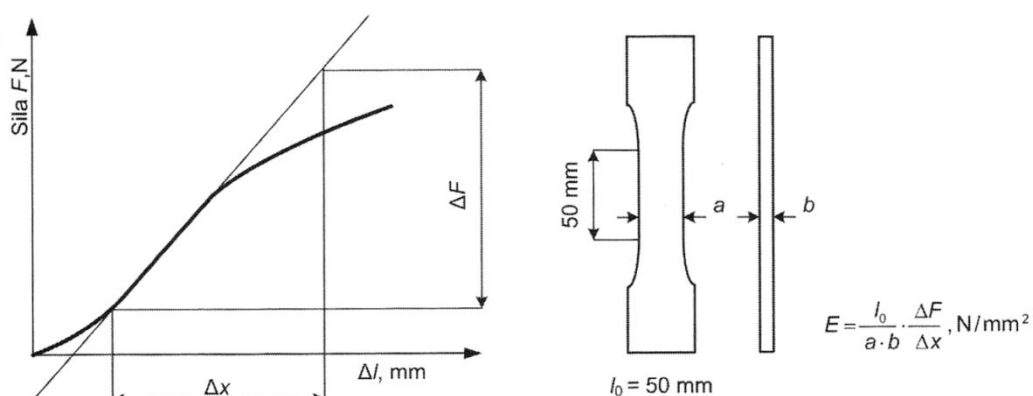
Konačno istezanje, istegnuće, je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine epruvete.

Prekidno istezanje je omjer prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete.

Važno su svojstvo i *moduli elastičnosti*. U općem slučaju *modul* elastičnosti je faktor proporcionalnosti i označuje omjer između naprezanja i deformacije ($E = \sigma/\epsilon$).

Najčešće je to *modul rasteznosti* (rastezni modul elastičnosti) (E_r) i *modul smičnosti* (modul elastičnosti pri djelovanju smičnog naprezanja) (G). Valja razlikovati *modul pritishnosti* E_p (pritisni modul elastičnosti, djelovanje jednoosnog pritishnog opterećenja) i *modul stlačivosti* (djelovanje troosnog tlačnog naprezanja $\Delta K = p/V/V_o$).

Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala pri rasteznom opterećenju prikazan je na slici 3.7. Radi se o postupnom povećanju opterećenja (sile koja djeluje na ispitak), te određivanju pripadnog produljenja. Crtanjem dijagrama «opterećenje-produljenje» uočava se linearno područje, odnosno proporcionalni odnos opterećenja i produljenja. Primjenom odgovarajućih izraza mogu se izračunati vrijednosti modula rastezljivosti.



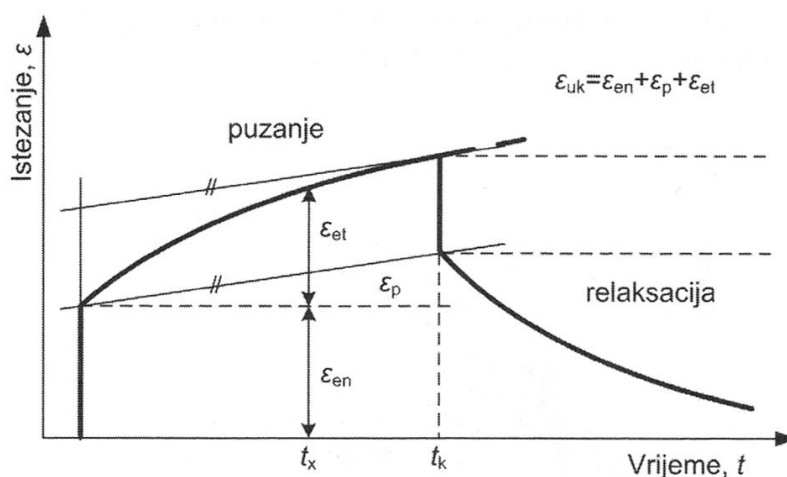
Slika 3.7. Postupak određivanja modula elastičnosti polimernih materijala [2]

3.2.2. DUGOTRAJNA MEHANIČKA ISPITIVANJA [2]

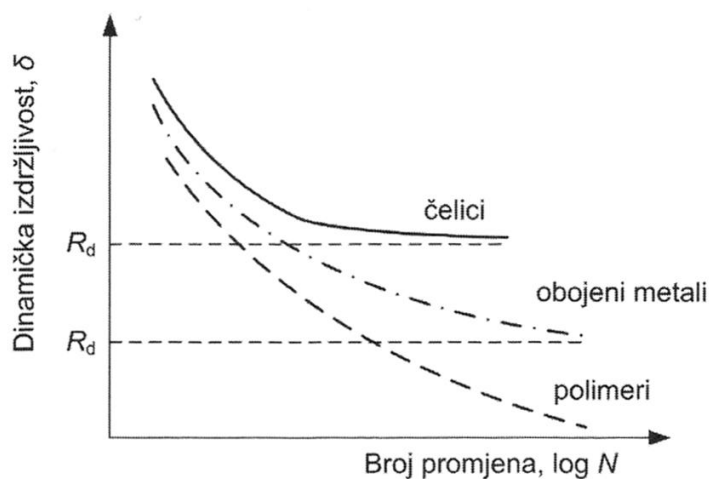
Osim poznavanja ponašanja u uvjetima kratkotrajnog opterećenja, za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala važno je poznavanje ponašanja u uvjetima dugotrajnog opterećenja (slike 3.8 i 3.9).

Iz tablice 3.2 proizlazi, pri dugotrajnom opterećenju razlikuje se statičko (dugotrajno nepromjenjivo) i dinamičko (dugotrajno ciklički promjenjivo) opterećenje.

Na slici 3.8 prikazano je ponašanje nekog polimernog materijala pri opterećivanju (puzanje) i nakon rasterećenja (relaksacija odnosno opuštanje).



Slika 4. Temeljni prikaz ponašanja polimernih materijala pri dugotrajnom statičkom opterećenju (krivulje puzanja i relaksacije polimernih materijala) [2]



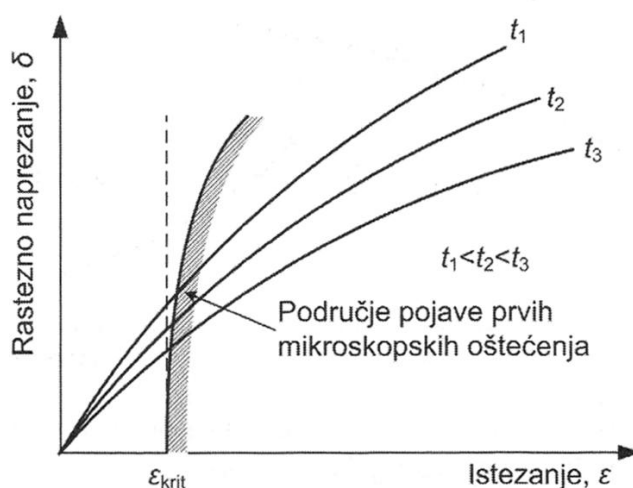
Slika 3.9. Prikaz ponašanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju [2]

Pri dugotrajnom statičkom opterećenju pojavljuje se *puzanje*, a pri dinamičkom *zamor materijala*. Te se pojave mogu dobro opisati *statičkom* i *dinamičkom izdržljivošću*.

Statička izdržljivost najveće je dugotrajno statičko naprezanje koje materijal može izdržati (bez loma ili dosezanja neke granične deformacije) praktički beskonačno dugo, a *dinamička izdržljivost* najveće dinamičko naprezanje pri kojem materijal može izdržati praktički beskonačan broj ciklusa (bez pojave loma).

Pri dinamičkom opterećenju polimernih materijala preklapaju se mehanički i drugi (npr. toplinski) utjecaji pa je u takvim uvjetima ponašanje polimernih materijala kompleksno. Polimerni materijali uvelike prigušuju vibracije, a to izaziva pojačano generiranje topline. Zbog niske toplinske vodljivosti polimernih materijala povisuje se temperatura materijala. Stoga mehanička svojstva polimernih materijala izravno ovise o temperaturi pa se rezultati ispitivanja polimernih materijala pri dinamičkom opterećenju vrednuju drugačije nego kod drugih materijala. Na slici 3.9 valja uočiti različitost oblika Wöhlerove krivulje (ona omogućuje definiranje dinamičke izdržljivosti materijala) za čelike, obojene metale i polimere. Kao što se vidi na slici, kod polimernih materijala treba uzeti u obzir vremenski faktor i govoriti o *vremenskoj dinamičkoj izdržljivosti*, kojom se označuje izdržavanje materijala samo na određeno vrijeme, odnosno za određeni broj titraja bez puknuća.

Uz Wöhlerovu krivulju za konstrukcijsku primjenu polimernih materijala bitne su informacije koje proizlaze iz izokronih dijagrama *naprezanje-istezanje* (slika 3.10).



Slika 3.10. Izokronni dijagram *naprezanje-istezanje* [2]

Izokroni dijagrami sadržavaju krivulje ovisnosti *naprezanje-istezanje*, za različita trajanja opterećenja, pri čemu t_1 znači najkraće, a t_2 i t_3 postupno sve duže trajanje opterećenja.

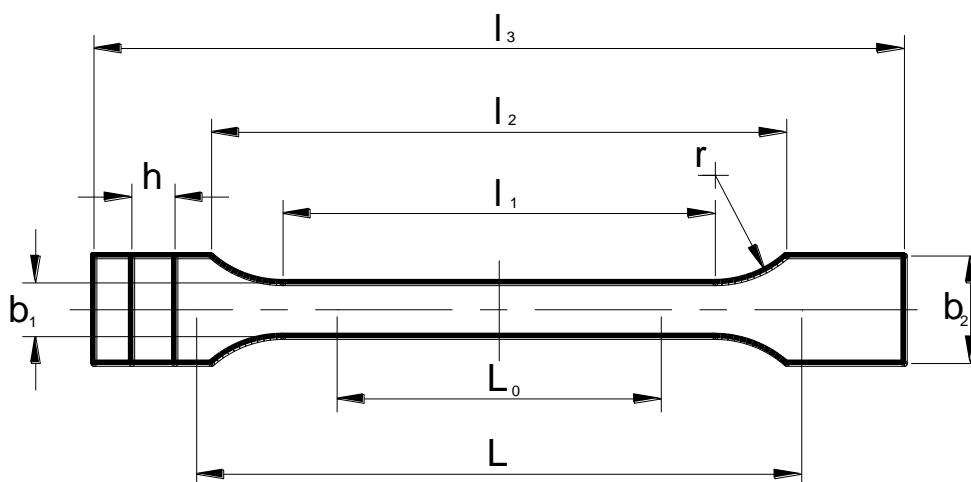
U uvjetima dugotrajnog statičkog opterećenja pri sobnoj, a još prije na povišenim temperaturama, materijal se oštećuje, što je povezano s mogućim pojavama nepravilnosti u građi makromolekulnih struktura.

4. ISPITNO TIJELO [13]

Prema normama ISO 527 – 2: 1993 ispitno tijelo je bučićastog oblika. Postoje dva osnovna tipa:

- 1A – za višenamjensko ispitivanje
- 1B – za strojna ispitna tijela.

Na slici 4.1 prikazan je oblik ispitnog tijela.



Slika 4.1. Oblik ispitnog tijela [13]

Tablica 4.1 prikazuje dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B.

Tablica 3.1. Dimenzije ispitnog tijela 1A i 1B [13]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	$\geq 150^{(1)}$	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – polumjer	20-25	$\geq 60^{(2)}$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104-113^{(3)}$	$106-120^{(3)}$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,5$	
L – početna udaljenost između ispitivanja	115 ± 1	l_{20}^{+5}

(1) Za neke materijale duljina se mora povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) da se izbjegne lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice.

$$(2) \quad r = \frac{\left[(l_2 - l_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 \right]}{4 \cdot (b_2 - b_1)}.$$

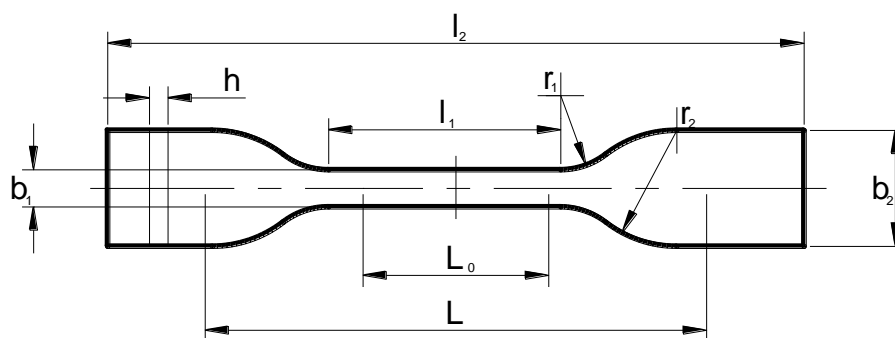
(3) U zavisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije.

Za male ispitke rabe se tipovi 1BA i 1BB. Njihove dimenzije prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Dimenzije ispitnog tijela 1BA i 1BB [13]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1BA	1BB
l_3 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 30
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r – polumjer	≥ 30	≥ 12
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	58 ± 2	23 ± 2
b_2 – širina pri kraju	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 2
L_0 – mjerna duljina	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L – početna udaljenost između ispitivanja	l_{20}^{+2}	l_{20}^{+1}

Za neke specijalne slučajeve primjenjuju se tipovi 5A i 5B. Specijalni oblik ispitnog tijela vidi se na slici 4.2.



Slika 4.2. Specijalni oblik ispitnog tijela [13]

U tablici 4.3 prikazane su dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B.

Tablica 4.3. Dimenzije ispitnog tijela 5A i 5B [13]

Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	5A	5B
l_2 – ukupna duljina	≥ 75	≥ 35
b_2 – širina pri kraju	$12,5 \pm 1$	$6 \pm 0,5$
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	25 ± 1	$12 \pm 0,5$
b_1 – širina uskog dijela	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
r_1 – mali polumjer	$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
r_2 – veliki polumjer	$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$
L – početna udaljenost između ispitivanja	50 ± 2	20 ± 2
L_0 – mjerna duljina	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
h – debljina	≥ 2	≥ 1

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. CILJ ISTRAŽIVANJA

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno primjenom centralno-kompozitnog plana pokusa analizirati utjecaj temperature medija za temperiranje te vremena trajanja naknadnog tlaka na dimenzije (širinu i duljinu), masu i tvrdoću otpreska amornog i kristalastog plastomera. U svrhu dobivanja potrebnih podataka provedeni su pretpokus i pokus injekcijskog prešanja ispitnih tijela prema ISO normama (slika 5.1).



Slika 5.1. Ispitna tijela prema ISO normama

5.2. ISPITNI MATERIJAL I OPREMA

5.2.1. ISPITNI MATERIJAL

Kao amorfni plastomer odabran je akrilonitril/butadien/stiren (ABS) koji je prikazan na slici 5.2.



Slika 5.2. Akrilonitril/butadien/stiren (ABS)

Svojstva ABS-a dana su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Svojstva ABS-a [14]

Svojstvo	Vrijednost	Jedinica
Gustoća	1050	kg/m ³
Temperatura sušenja	80	°C
Vrijeme sušenja	2-4	h
Talište	230-270	°C
Temperatura stijenke kalupne šupljine	30-60	°C
Skupljanje	0,4-0,7	%
Rastezna čvrstoća	2400	MPa
Savojna čvrstoća	72	MPa
Toplinska provodnost	0,17	W/mK

Kao kristalasti plastomer izabran je polipropilen (PP) koji je prikazan na slici 5.3.



Slika 5.3. Polipropilen (PP)

Svojstva PP-a dana su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Svojstva PP-a [15]

Svojstvo	Vrijednost	Jedinica
Gustoća	904	kg/m ³
Rastezna čvrstoća	1200	MPa
Tvrdoća	80	Rockwell R skala
Talište	230-260	°C
Temperatura stijenke kalupne šupljine	10-30	°C
Skupljanje	1-2	%

5.2.2. OPREMA

Pretpokus i pokus izvedeni su u pogonskim uvjetima. Materijal je sušen u ormar-sušari proizvođača *Moretto*. Debljina sloja granulata iznosila je 20 mm. Temperiralo proizvođača *Regloplas* (slika 5.4) omogućilo je dobivanje potrebne temperature medija za temperiranje (ulja).



Slika 5.4. Temperiralo proizvođača *Regloplas*

Injekcijsko prešanje provedeno je na ubrizgavalici proizvođača *Arburg*, model *Allrounder 320D 850-210* sa silom zatvaranja kalupa od 850 kN (slika 5.5).



Slika 5.5. Ubrizgavalica proizvođača *Arburg*, model *Allrounder 320D 850-210*

Ostali tehnički podaci spomenute ubrizgavalice dani su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Tehnički podaci ubrizgavalice proizvođača *Arburg*, model *Allrounder 320D 850-210* [16]

Karakteristika ubrizgavalice	Vrijednost	Jedinica
Promjer pužnog vijka	25-35	mm
Frekvencija vrtnje pužnog vijka	570	min ⁻¹
Obujam ubrizgavanja	47-70	cm ³
Tlak ubrizgavanja	1500-2400	bar
Sila zatvaranja kalupa	850	kN
Hod otvaranja kalupa	375	mm
Minimalna ugradbena visina kalupa	250	mm

Širina ispitnih epruveta izmjerena je s pomoću digitalne pomične mjerke proizvođača *Micromaster*, razlučivosti 0,001 mm (slika 5.6). Mjerno područje mjerke iznosi od 0 do 30 mm.



Slika 5.6. Digitalna pomična mjerka proizvođača *Micromaster*

Duljina ispitnih epruveta izmjerena je s pomoću pomične mjerke proizvođača *Somet*, razlučivosti 0,01 mm (slika 5.7). Mjerno područje iznosi od 150 do 175 mm.



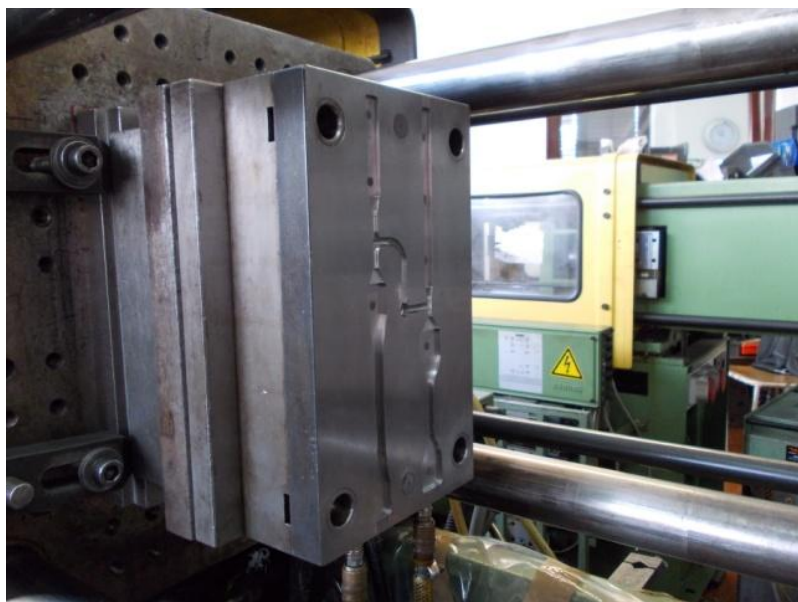
Slika 5.7. Pomična mjerka proizvođača *Somet*

Za mjerenje mase ispitnih epruveta upotrebljena je digitalna vaga proizvođača *Kern&Sohn*, tipa *EW1500-2M*, razreda točnosti II, podjeljka 0,01 g, a prikazana na slici 5.8.

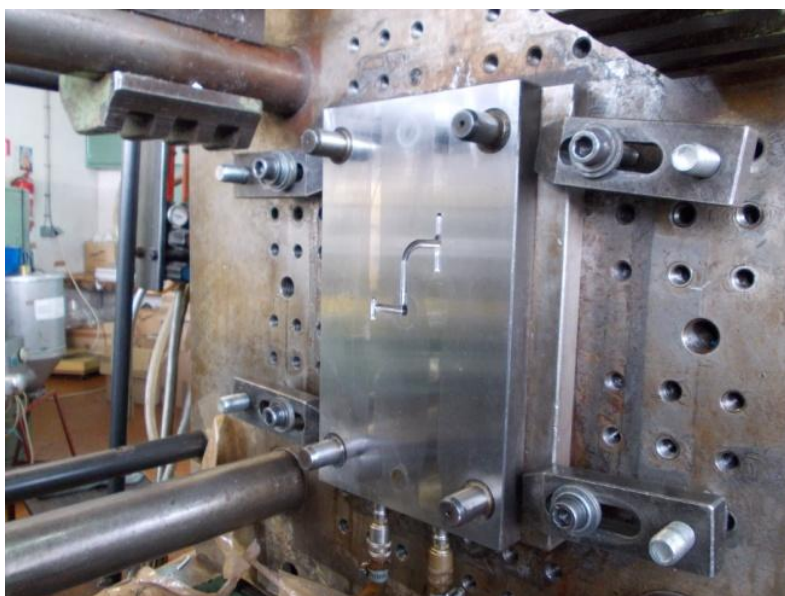


Slika 5.8. Digitalna vaga proizvođača *Kern&Sohn*

Na slici 5.9 prikazan je pomičan dio kalupa, a na slici 5.10 nepomičan dio kalupa.



Slika 5.9. Pomičan dio kalupa



Slika 5.10. Nepomičan dio kalupa

Mjerenje tvrdoće provedeno je uređajem za mjerenje tvrdoće po *Shoreu*, skala D (slika 5.11).



Slika 5.11. Uređaj za mjerenje tvrdoće po *Shoreu*

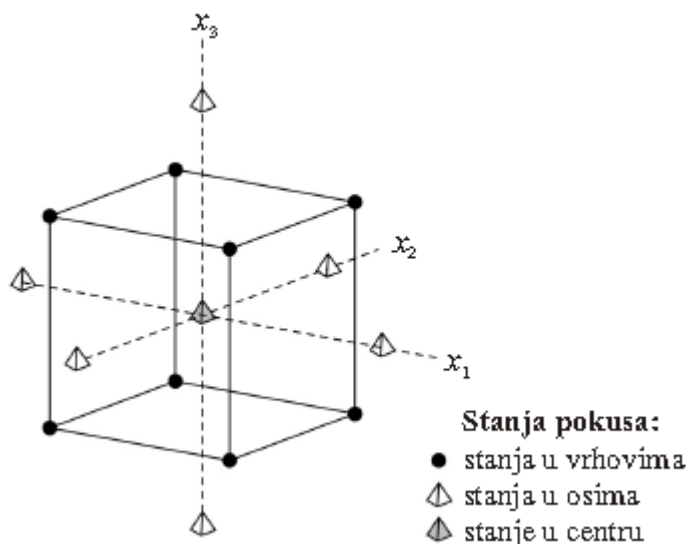
Plan pretpokusa i pokusa napravljeni su s pomoću programa za statističku obradu podataka *Design Expert*. Također su s pomoću istog programa obrađeni podaci dobiveni pokusom.

5.3. CENTRALNO-KOMPOZITNI PLAN POKUSA

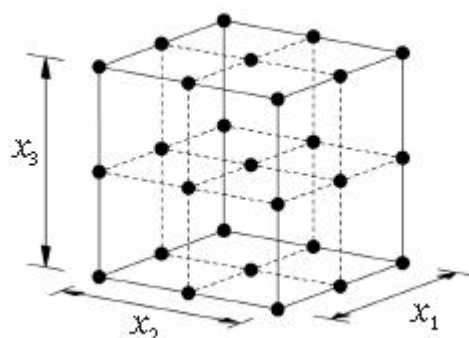
Centralno-kompozitni pokus pripada skupini pokusa višeg reda, tzv. *metodama odzivne površine*. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete proizvoda je *odziv*. Odzivna površina s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću dopušta predviđanje budućih rezultata u okviru analiziranog područja, te daje uvid u čitav proces. U praksi se pokazalo kako su najčešće dovoljne funkcije odziva prvog i drugog reda. Polinomske aproksimacije pogodne su posebice stoga što omogućuju lagano izračunavanje koeficijenata polinoma, ali se trebaju smatrati samo aproksimacijom stvarne zakonitosti i to u istraživanom području. [17,18]

Centralno-kompozitni pokus je model pokusa 1. reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima kako bi se omogućila procjena parametara modela 2. reda. Centralno-kompozitni model pokusa sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u centru pokusa (k - broj promatranih faktora). Centralno-kompozitni pokus je alternativa $3k$ modelu u izgradnji modela pokusa 2. reda. Pri tome je broj izvođenja (faktorskih stanja) smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa. [18]

Za $k = 3$ (faktori su x_1 , x_2 i x_3), na slici 5.12, prikazan je model centralno-kompozitnog pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa. U slučaju potpunog faktorskog plana pokusa (slika 5.13), bilo bi potrebno 27 stanja pokusa.



Slika 5.12. Model pokusa: centralno-kompozitni plan pokusa s 3 faktora [18]

Slika 5.13. Model pokusa: potpuni faktorski plan pokusa 3^k [18]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotatabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednaka nuli. Rotatabilnost centralno-kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotatabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa). [19]

Pokus je rotabilan ukoliko je [20]:

$$\alpha = \sqrt[k]{F} \quad (5.1)$$

gdje je F - broj faktorskih stanja ($F = 2^k$ u slučaju potpunog faktorskog pokusa).

U tablici 5.4 navedene su vrijednosti α za rotabilni centralno-kompozitni pokus.

Tablica 5.4. Vrijednosti osne udaljenosti α [17]

Broj faktora k	Broj faktorskih stanja F	Broj ukupnih stanja pokusa N	Osna udaljenost α
2	4	$8 + n_c^*$	1,414
3	8	$14 + n_c$	1,682
4	16	$24 + n_c$	2,000
5	32	$32 + n_c$	2,378

* n_c – broj stanja u centru pokusa

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. [17] Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti grešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena greške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena greška pokusa predstavlja čistu grešku (e. *pure error*), odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [17,19]

Polinom II. stupnja kojim se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi [19]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (5.2)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti. [19]

5.4. PRETPOKUS – ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

U pretpokusu je bilo potrebno odrediti maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka na amorfni i na kristalasti plastomer, odnosno vrijeme trajanja naknadnog tlaka nakon kojeg više nema utjecaja na svojstva ispitnih epruveta.

5.4.1. PROVEDBA PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

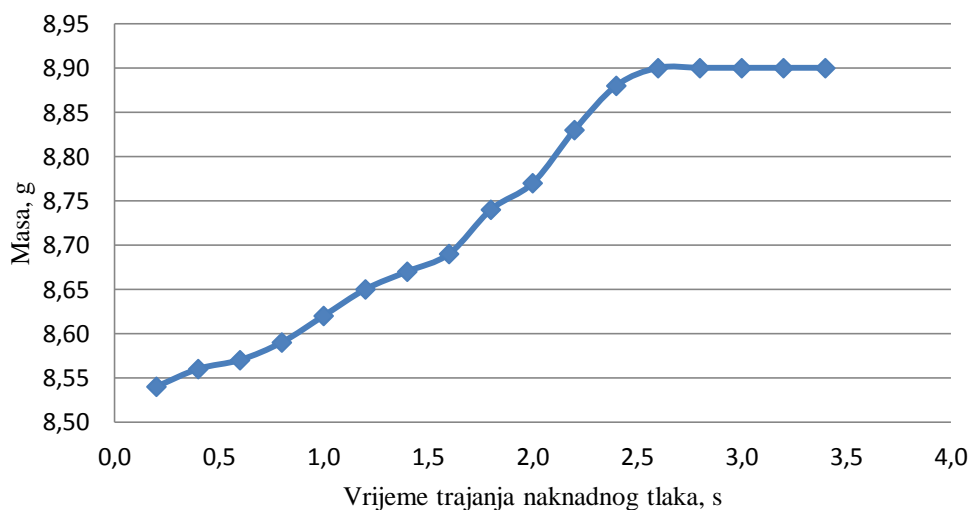
Uz konstantne uvjete preradbe povećavano je vrijeme trajanja naknadnog tlaka od minimuma za 0,2 s. Konstantni uvjeti preradbe dani su u tablici 5.5, a izabrani su prema iskustvu i preporuci proizvođača materijala. Odmah nakon injekcijskog prešanja, ispitna tijela su vagana na digitalnoj vagi kako bi se uvidjelo kada masa postaje konstantna, odnosno kada vrijeme naknadnog tlaka prestaje imati utjecaj.

Tablica 5.5. Konstantni uvjeti preradbe pretpokusa

Materijal		PP	ABS
Uvjet	Jedinica	Vrijednost	
Temperatura medija za temperiranje	°C	45	60
Temperatura preradbe	°C	220-230-240-220	230-240-250-230
Tlak ubrizgavanja	bar	96	102
Brzina ubrizgavanja	%	75	85
Vrijeme ubrizgavanja	S	0,53	0,56
Brzina naknadnog tlaka	%	30	45
Visina naknadnog tlaka	bar	80	80

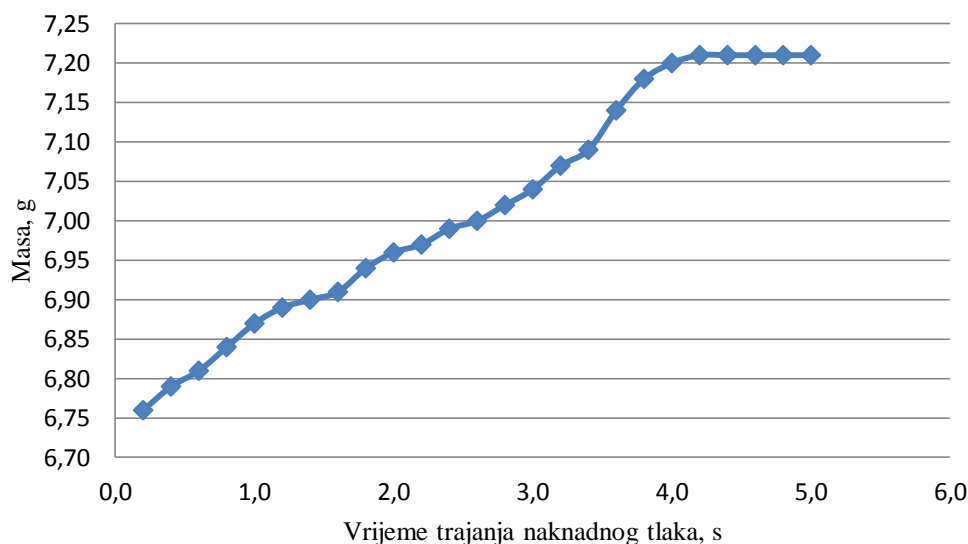
5.4.2. REZULTATI PRETPOKUSA - ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG VREMENA TRAJANJA NAKNADNOG TLAKA

Rezultati pretpokusa za ABS prikazani su u tablici 8.1 u prilogu i na slici 5.14. Masa ispitka ustalila se nakon 2,6 s i iznosila je 8,9 g.



Slika 5.14. Rezultati pretpokusa za ABS

Rezultati pretpokusa za PP prikazani su u tablici 8.2 u prilogu i na slici 5.15. Masa ispitne epruvete se ustalila nakon 4,2 s i iznosila je 7,21 g.



Slika 5.15. Rezultati pretpokusa za PP

5.5. POKUS – UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA

U pokusu je bilo potrebno odrediti utjecaj temperature medija za temperiranje i vremena naknadnog tlaka na masu, tvrdoću i dimenzije ispitnih epruveta.

5.5.1. PROVEDBA POKUSA – UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA

Pokus je proveden na jednom amorfnom i jednom kristalastom plastomeru. Konstantni uvjeti preradbe jednaki su kao i u pretpokusu. Promjenjivi parametri su temperatura medija za temperiranje i vrijeme naknadnog tlaka. Razine faktora određene su prema matrici stanja pokusa za centralno-kompozitni plan pokusa s dva faktora (tablica 5.6). Bilo je potrebno provesti 13 stanja pokusa za svaki materijal. Temperatura okoline bila je približno 25 °C. Pokus se izvodio statistički slučajno, prema tablici slučajnih brojeva. Za svako stanje pokusa svakog materijala injekcijski su prešane 3 ispitne epruvete. Odmah nakon injekcijskog prešanja izmjerena je masa, tvrdoća te širina i duljina ispitnih tijela. Nakon 48 sati mjerenje širine i duljine je ponovljeno. Na kraju su uzete srednje vrijednosti dobivenih rezultata.

Tablica 5.6. Faktori i njihove razine

Materijal	ABS		PP	
	x ₁ Temperatura medija za temperiranje, °C	x ₂ Trajanje naknadnog tlaka, s	x ₁ Temperatura medija za temperiranje, °C	x ₂ Trajanje naknadnog tlaka, s
-1,68	31,7	0,2	23,8	0,3
-1	40,0	0,6	30,0	1,0
0	60,0	1,6	45,0	2,6
+1	80,0	2,6	60,0	4,2
+1,68	88,3	3,0	66,2	4,9

5.5.2. REZULTATI POKUSA - UTJECAJ TEMPERATURE MEDIJA ZA TEMPERIRANJE I VREMENA NAKNADNOG TLAKA NA MASU, TVRDOĆU I DIMENZIJE ISPITNIH EPRUVETA

U prilogu u tablici 8.3 navedene su sve vrijednosti dobivene pokusom za materijal ABS. Izračunate srednje vrijednosti promatranih svojstva prikazane su u tablici 5.7. Isto tako za materijal PP u tablici 8.4 u prilogu nalaze se sve vrijednosti dobivene pokusom, a izračunate srednje vrijednosti promatranih svojstva navedene su u tablici 5.8.

Tablica 5.7. Srednje vrijednosti rezultata pokusa za materijal ABS

Stanje	Redoslijed izvođenja	Temperatura medija za temperiranje, °C	Trajanje naknadnog tlaka, s	Masa, g	Širina, mm	Duljina, mm	Širina nakon 48 h, mm	Duljina nakon 48 h, mm	Tvrdoća, Shore D
9	1	60,0	1,6	8,68	10,05	160,10	9,99	159,56	76,33
2	2	80,0	0,6	8,56	9,97	160,39	9,92	159,36	74,67
4	3	80,0	2,6	8,85	10,04	160,20	10,00	159,74	77,33
10	4	60,0	1,6	8,68	10,02	160,33	9,98	159,51	80,00
8	5	60,0	3,0	8,87	10,05	160,25	10,01	159,68	80,67
11	6	60,0	1,6	8,68	10,01	160,51	9,97	159,53	71,33
13	7	60,0	1,6	8,68	10,02	160,55	9,98	159,54	81,33
12	8	60,0	1,6	8,68	10,01	160,51	9,97	159,50	76,33
5	9	31,7	1,6	8,77	10,05	160,30	10,02	159,59	80,00
3	10	40,0	2,6	8,88	10,05	160,54	10,01	159,67	80,33
1	11	40,0	0,6	8,58	10,03	160,39	9,99	159,37	76,00
7	12	60,0	0,2	8,49	10,02	160,23	9,97	159,20	77,67
6	13	88,3	1,6	8,66	9,99	160,55	9,94	159,52	80,33

Tablica 5.8. Srednje vrijednosti rezultata pokusa za materijal PP

Stanje	Redoslijed izvođenja	Temperatura medija za temperiranje, °C	Trajanje naknadnog tlaka, s	Masa, g	Širina, mm	Duljina, mm	Širina nakon 48 h, mm	Duljina nakon 48 h, mm	Tvrdoća, Shore D
3	1	30,0	4,2	7,26	9,94	159,53	9,85	158,04	66,00
10	2	45,0	2,6	6,95	9,90	159,32	9,77	157,38	66,00
9	3	45,0	2,6	6,95	9,89	159,32	9,77	157,37	66,00
11	4	45,0	2,6	6,94	9,88	159,18	9,77	157,34	66,00
13	5	45,0	2,6	6,94	9,88	159,31	9,77	157,34	66,33
6	6	66,2	2,6	6,96	9,88	159,28	9,77	157,49	68,33
8	7	45,0	4,9	7,26	9,94	159,55	9,85	157,89	65,67
7	8	45,0	0,3	6,71	9,79	159,42	9,66	156,78	66,33
5	9	23,8	2,6	6,99	9,87	159,33	9,77	157,63	66,00
2	10	60,0	1,0	6,80	9,85	159,37	9,76	157,09	65,67
4	11	60,0	4,2	7,06	9,90	159,37	9,81	157,60	66,67
12	12	45,0	2,6	6,94	9,89	159,33	9,77	157,32	66,33
1	13	30,0	1,0	6,82	9,76	159,26	9,68	157,19	64,67

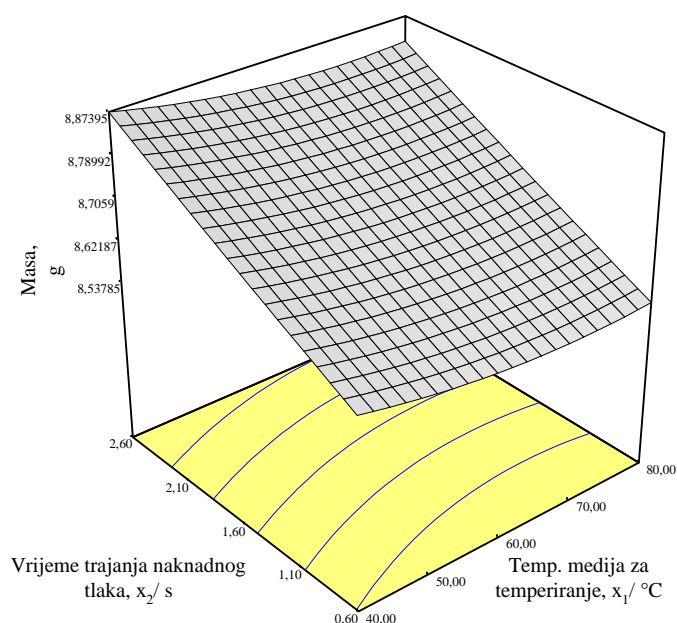
5.5.3. UTJECAJ NA MASU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.9 prikazani su rezultati obrade utjecaja na masu za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.9. Rezultati analize varijance – masa, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,17	5	0,033	84,68	< 0,0001
	x_1	$4,945 \cdot 10^{-3}$	1	$4,945 \cdot 10^{-3}$	12,58	0,0094
	x_2	0,16	1	0,16	400,92	< 0,0001
	x_1^2	$3,883 \cdot 10^{-3}$	1	$3,883 \cdot 10^{-3}$	9,88	0,0163
	x_2^2	$9,141 \cdot 10^{-5}$	1	$9,141 \cdot 10^{-5}$	0,23	0,6443
	$x_1 \cdot x_2$	$2,778 \cdot 10^{-6}$	1	$2,778 \cdot 10^{-6}$	$7,068 \cdot 10^{-3}$	0,9354
Ostatak		$2,751 \cdot 10^{-3}$	7	$3,930 \cdot 10^{-4}$		
	Odstupanje od modela	$2,720 \cdot 10^{-3}$	3	$9,066 \cdot 10^{-4}$	116,56	0,0002
	Pogreška	$3,111 \cdot 10^{-5}$	4	$7,778 \cdot 10^{-6}$		
Ukupno		0,17	12			

Slika 5.16 prikazuje ovisnost mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Iz slike se može vidjeti da masa raste porastom vremena trajanja naknadnog tlaka, te da temperatura medija za temperiranje nema utjecaja na masu.



Slika 5.16. Prikaz ovisnosti mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.10 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Koeficijent determiniranosti je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je vrijednost koeficijenta determiniranosti bliža 1, model bolje slijedi podatke, odnosno pojava je bolje objašnjena. [21]

Tablica 5.10. Pregled statističkih podataka o modelu – masa, ABS

Standardno odstupanje	0,020
Aritmetička sredina	8,70
Koeficijent determiniranosti	0,9837

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja mase:

$$y = 8,68 - 0,025 \cdot x_1 + 0,14 \cdot x_2 + 0,024 \cdot x_1^2 + 3,625 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 - 8,333 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.3)$$

Jednadžba za izračunavanje mase sa stvarnim faktorima:

$$y = 8,74862 - 8,26394 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,13124 \cdot x_2 + 5,90625 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 + 3,625 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 - 4,16667 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.4)$$

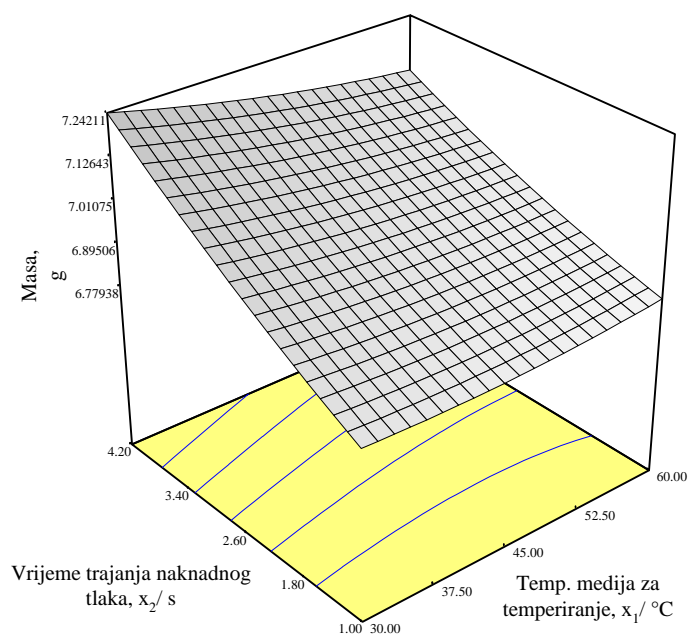
5.5.4. UTJECAJ NA MASU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.11 prikazani su rezultati obrade utjecaja na masu za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.11. Rezultati analize varijance – masa, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H₀
Model		0,29	5	0,058	95,86	< 0,0001
	x₁	8,265 · 10 ⁻³	1	8,265 · 10 ⁻³	13,62	0,0077
	x₂	0,27	1	0,27	445,05	< 0,0001
	x₁²	1,981 · 10 ⁻³	1	1,981 · 10 ⁻³	3,27	0,1137
	x₂²	3,329 · 10 ⁻³	1	3,329 · 10 ⁻³	5,49	0,0517
	x₁ · x₂	7,803 · 10 ⁻³	1	7,803 · 10 ⁻³	12,86	0,0089
Ostatak		4,247 · 10 ⁻³	7	6,067 · 10 ⁻⁴		
	Odstupanje od modela	4,158 · 10 ⁻³	3	1,386 · 10 ⁻³	62,37	0,0008
	Pogreška	8,889 · 10 ⁻⁵	4	2,222 · 10 ⁻⁵		
Ukupno		0,30	12			

Slika 5.17 prikazuje ovisnost mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Iz slike se može zaključiti da masa reagira jednako kao i kod ABS-a, što znači da raste porastom vremena trajanja naknadnog tlaka, te da temperatura medija za temperiranje nema bitnog utjecaja na masu.



Slika 5.17. Prikaz ovisnosti mase o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.12 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.12. Pregled statističkih podataka o modelu – masa, PP

Standardno odstupanje	0,025
Aritmetička sredina	6,97
Koeficijent determiniranosti	0,9856

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja mase:

$$y = 6,94 - 0,032 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 + 0,017 \cdot x_1^2 + 0,022 \cdot x_2^2 - 0,044 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.5)$$

Jednadžba za izračunavanje mase sa stvarnim faktorima:

$$y = 6,73554 - 4,10811 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,1532 \cdot x_2 + 7,5 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 + 8,54492 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 - 1,84028 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.6)$$

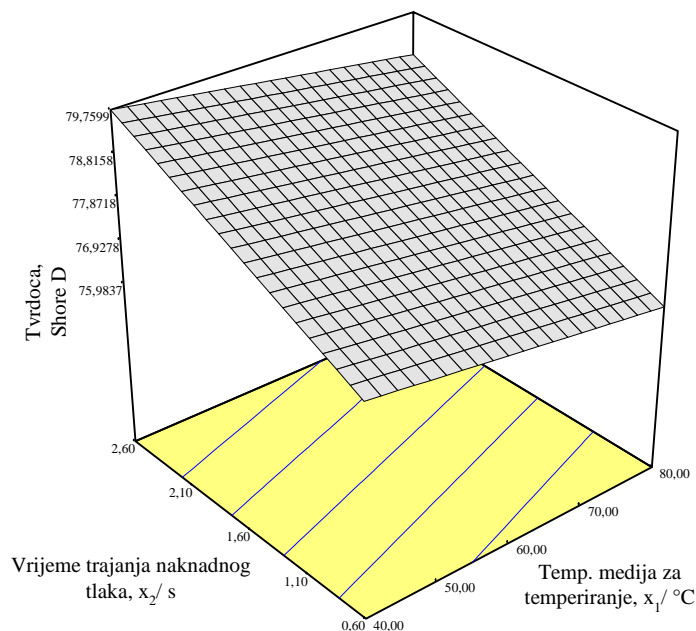
5.5.5. UTJECAJ NA TVRDOĆU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.13 prikazani su rezultati obrade utjecaja na tvrdoću za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.13. Rezultati analize varijance – tvrdoća, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		17,66	2	8,83	1,04	0,3887
	x_1	1,86	1	1,86	0,22	0,6494
	x_2	15,80	1	15,80	1,86	0,2024
Ostatak		84,90	10	8,49		
	Odstupanje od modela	24,14	6	4,02	0,26	0,9276
	Pogreška	60,76	4	15,19		
Ukupno		102,56	12			

Slika 5.18 prikazuje ovisnost tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Iz slike se može vidjeti da tvrdoća raste porastom vremena trajanja naknadnog tlaka, a temperatura medija za temperiranje nema većeg utjecaja na tvrdoću.



Slika 5.18. Prikaz ovisnosti tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.14 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu. Vrijednost koeficijenta determiniranosti izrazito je nizak što znači da model loše slijedi podatke.

Tablica 5.14. Pregled statističkih podataka o modelu – tvrdoća, ABS

Standardno odstupanje	2,91
Aritmetička sredina	77,87
Koeficijent determiniranosti	0,1722

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja tvrdoće:

$$y = 77,87 - 0,48 \cdot x_1 + 1,41 \cdot x_2 \quad (5.7)$$

Jednadžba za izračunavanje tvrdoće sa stvarnim faktorima:

$$y = 77,07149 - 0,024137 \cdot x_1 + 1,40533 \cdot x_2 \quad (5.8)$$

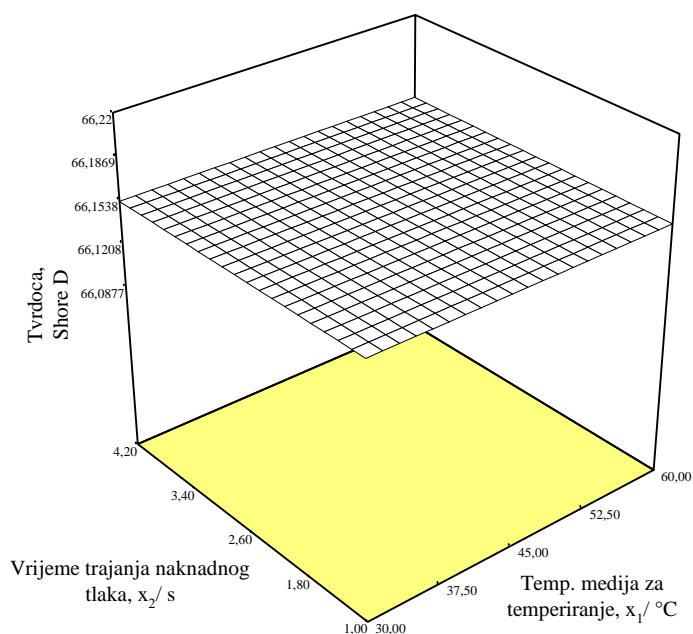
5.5.6. UTJECAJ NA TVRDOĆU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.15 prikazani su rezultati obrade utjecaja na tvrdoću za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.15. Rezultati analize varijance – tvrdoća, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla <i>F</i>	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,000	0			
Ostatak		7,91	12	0,66		
	Odstupanje od modela	7,78	8	0,97	29,18	0,0027
	Pogreška	0,13	4	0,033		
Ukupno		7,91	12			

Slika 5.19 prikazuje ovisnost tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Iz slike se može zaključiti da niti jedan od parametara ne utječe na tvrdoću.



Slika 5.19. Prikaz ovisnosti tvrdoće o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.16 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu. S obzirom da je koeficijent determiniranosti jednak 0, nije moguće postaviti kodiranu jednadžbu za izračunavanje predviđanja tvrdoće, kao ni jednadžbu za izračunavanje tvrdoće sa stvarnim faktorima.

Tablica 5.16. Pregled statističkih podataka o modelu – tvrdoća, PP

Standardno odstupanje	0,81
Aritmetička sredina	66,15
Koeficijent determiniranosti	0,000

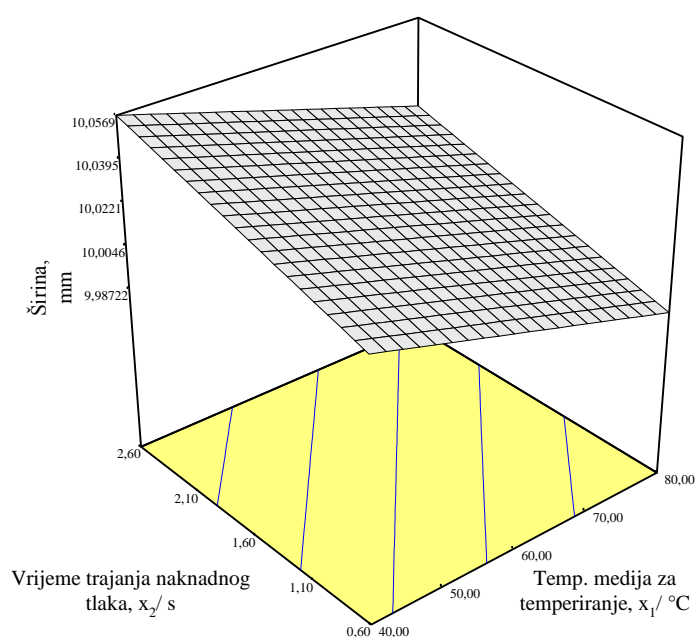
5.5.7. UTJECAJ NA ŠIRINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.17 prikazani su rezultati obrade utjecaja na širinu za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.17. Rezultati analize varijance – širina, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		$4,879 \cdot 10^{-3}$	2	$2,44 \cdot 10^{-3}$	11,81	0,0023
	x_1	$2,796 \cdot 10^{-3}$	1	$2,796 \cdot 10^{-3}$	13,54	0,0043
	x_2	$2,083 \cdot 10^{-3}$	1	$2,083 \cdot 10^{-3}$	10,08	0,0099
Ostatak		$2,066 \cdot 10^{-3}$	10	$2,066 \cdot 10^{-4}$		
	Odstupanje od modela	$1,133 \cdot 10^{-3}$	6	$1,888 \cdot 10^{-4}$	0,81	0,6119
	Pogreška	$9,333 \cdot 10^{-4}$	4	$2,333 \cdot 10^{-4}$		
Ukupno		$6,945 \cdot 10^{-3}$	12			

Slika 5.20 prikazuje ovisnost širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Iz slike se može vidjeti da širina lagano raste porastom vremena trajanja naknadnog tlaka, te lagano opada porastom temperature medija za temperiranje.



Slika 5.20. Prikaz ovisnosti širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.18 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.18. Pregled statističkih podataka o modelu – širina, ABS

Standardno odstupanje	0,014
Aritmetička sredina	10,02
Koeficijent determiniranosti	0,7025

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja širine:

$$y = 10,02 - 0,019 \cdot x_1 + 0,016 \cdot x_2 \quad (5.9)$$

Jednadžba za izračunavanje širine sa stvarnim faktorima:

$$y = 10,05232 - 9,34793 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 + 0,016137 \cdot x_2 \quad (5.10)$$

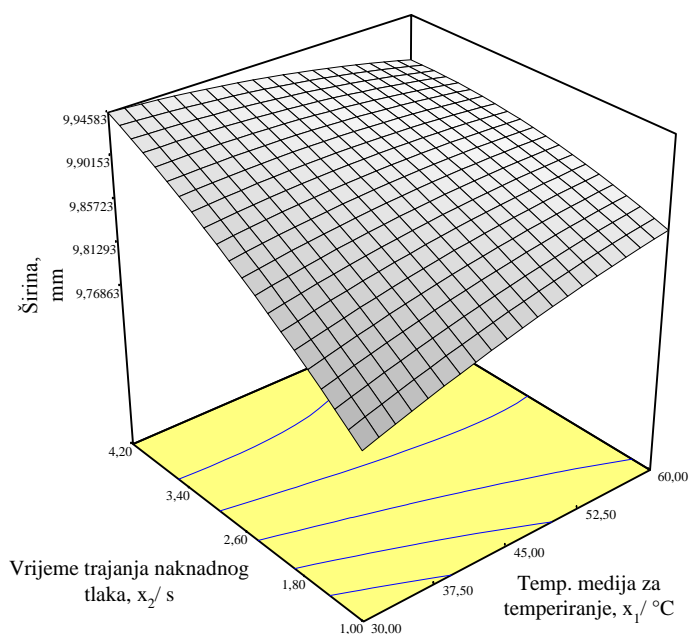
5.5.8. UTJECAJ NA ŠIRINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.19 prikazani su rezultati obrade utjecaja na širinu za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.19. Rezultati analize varijance – širina, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla <i>F</i>	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,031	5	$6,293 \cdot 10^{-3}$	66,43	< 0,0001
	x_1	$5,926 \cdot 10^{-4}$	1	$5,926 \cdot 10^{-4}$	6,26	0,0409
	x_2	0,025	1	0,025	265,77	< 0,0001
	x_1^2	$3,913 \cdot 10^{-4}$	1	$3,913 \cdot 10^{-4}$	4,13	0,0816
	x_2^2	$1,237 \cdot 10^{-3}$	1	$1,237 \cdot 10^{-3}$	13,05	0,0086
	$x_1 \cdot x_2$	$4,225 \cdot 10^{-3}$	1	$4,225 \cdot 10^{-3}$	44,60	0,0003
Ostatak		$6,632 \cdot 10^{-4}$	7	$9,474 \cdot 10^{-5}$		
	Odstupanje od modela	$3,965 \cdot 10^{-4}$	3	$1,322 \cdot 10^{-4}$	1,98	0,2589
	Pogreška	$2,667 \cdot 10^{-4}$	4	$6,667 \cdot 10^{-5}$		
Ukupno		0,032	12			

Slika 5.21 prikazuje ovisnost širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Pri nižoj temperaturi medija za temperiranje uz porast vremena trajanja naknadnog tlaka, te pri kraćem vremenu trajanja naknadnog tlaka povećanjem temperature medija za temperiranje širina se povećava.



Slika 5.21. Prikaz ovisnosti širine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.20 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.20. Pregled statističkih podataka o modelu – širina, PP

Standardno odstupanje	$9,733 \cdot 10^{-3}$
Aritmetička sredina	9,87
Koeficijent determiniranosti	0,9794

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja širine:

$$y = 9,89 - 8,607 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,56 \cdot x_2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 - 0,013 \cdot x_2^2 - 0,032 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.11)$$

Jednadžba za izračunavanje širine sa stvarnim faktorima:

$$y = 9,50854 + 7,09463 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,12308 \cdot x_2 - 3,333 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 - 5,20833 \cdot 10^{-3} \cdot x_2^2 - 1,35417 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.12)$$

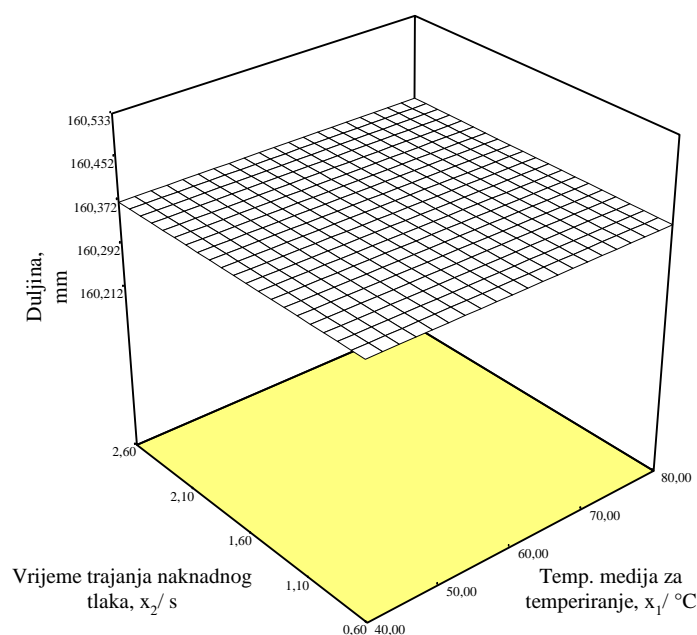
5.5.9. UTJECAJ NA DULJINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.21 prikazani su rezultati obrade utjecaja na duljinu za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.21. Rezultati analize varijance – duljina, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,000	0			
Ostatak		0,27	12	0,023		
	Odstupanje od modela	0,13	8	0,017	0,48	0,8269
	Pogreška	0,14	4	0,035		
Ukupno		70,27	12			

Slika 5.22 prikazuje ovisnost duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Iz slike se može zaključiti da niti jedan od parametara ne utječe na duljinu.



Slika 5.22. Prikaz ovisnosti duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.22 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu. S obzirom da je koeficijent determiniranosti jednak 0, nije moguće postaviti kodiranu jednadžbu za izračunavanje predviđanja duljine, kao ni jednadžbu za izračunavanje duljine sa stvarnim faktorima.

Tablica 5.22. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina, ABS

Standardno odstupanje	0,15
Aritmetička sredina	160,37
Koeficijent determiniranosti	0,000

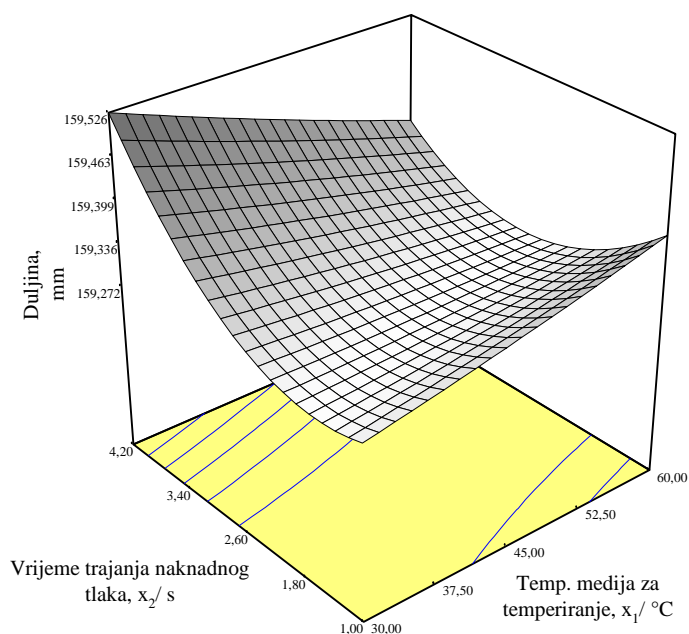
5.5.10. UTJECAJ NA DULJINU - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.23 prikazani su rezultati obrade utjecaja na duljinu za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.23. Rezultati analize varijance – duljina, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,10	5	0,021	9,03	0,0058
	x_1	$2,028 \cdot 10^{-3}$	1	$2,028 \cdot 10^{-3}$	0,88	0,3800
	x_2	0,025	1	0,025	10,82	0,0133
	x_1^2	$1,232 \cdot 10^{-4}$	1	$1,232 \cdot 10^{-4}$	0,053	0,8240
	x_2^2	0,060	1	0,060	25,78	0,0014
	$x_1 \cdot x_2$	0,017	1	0,017	7,50	0,0290
Ostatak		0,016	7	$2,311 \cdot 10^{-3}$		
	Odstupanje od modela	$1,316 \cdot 10^{-3}$	3	$4,386 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,9448
	Pogreška	0,015	4	$3,714 \cdot 10^{-3}$		
Ukupno		0,12	12			

Slika 5.23 prikazuje ovisnost duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Porastom vremena trajanja naknadnog tlaka i temperature medija za temperiranje duljina se smanjuje. Rastom temperature medija za temperiranje pri manjem vremenu trajanja naknadnog tlaka, kao i pri nižim temperaturama medija za temperiranje porastom vremena trajanja naknadnog tlaka duljina se povećava.



Slika 5.23. Prikaz ovisnosti duljine o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.24 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.24. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina, PP

Standardno odstupanje	0,048
Aritmetička sredina	159,35
Koeficijent determiniranosti	0,8658

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja duljine:

$$y = 159,29 - 0,015 \cdot x_1 + 0,056 \cdot x_2 + 4,208 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 + 0,093 \cdot x_2^2 - 0,066 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.13)$$

Jednadžba za izračunavanje duljine sa stvarnim faktorima:

$$y = 159,21024 + 4,38713 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 0,029602 \cdot x_2 + 1,87037 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 + 0,036149 \cdot x_2^2 - 2,74306 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.14)$$

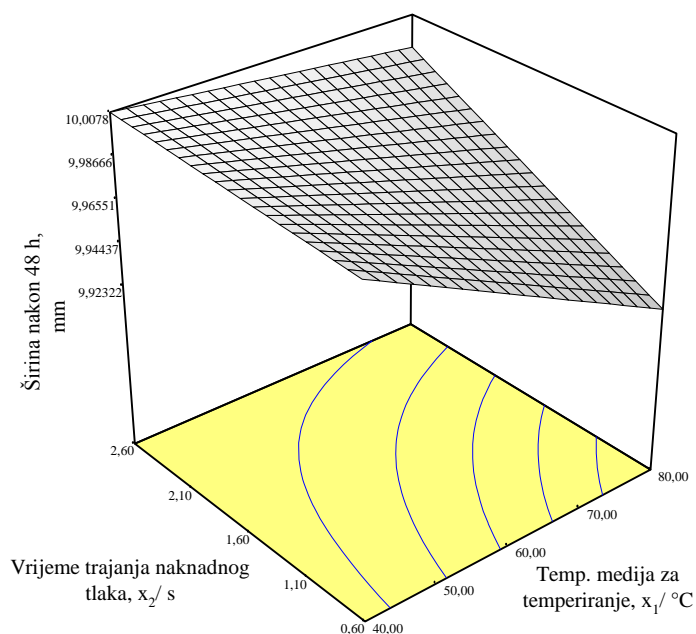
5.5.11. UTJECAJ NA ŠIRINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.25 prikazani su rezultati obrade utjecaja na širinu nakon 48 h za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.25. Rezultati analize varijance – širina nakon 48 h, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		$8,129 \cdot 10^{-3}$	3	$2,710 \cdot 10^{-3}$	21,50	0,0002
	x_1	$4,346 \cdot 10^{-3}$	1	$4,346 \cdot 10^{-3}$	34,48	0,0002
	x_2	$2,882 \cdot 10^{-3}$	1	$2,882 \cdot 10^{-3}$	22,87	0,0010
	$x_1 \cdot x_2$	$9,00 \cdot 10^{-4}$	1	$9,00 \cdot 10^{-4}$	7,14	0,0255
Ostatak		$1,134 \cdot 10^{-3}$	9	$1,260 \cdot 10^{-4}$		
	Odstupanje od modela	$6,766 \cdot 10^{-4}$	5	$1,353 \cdot 10^{-4}$	1,18	0,4481
	Pogreška	$4,578 \cdot 10^{-4}$	4	$1,144 \cdot 10^{-4}$		
Ukupno		$9,263 \cdot 10^{-3}$	12			

Slika 5.24 prikazuje ovisnost širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Pri većim temperaturama medija za temperiranje porastom vremena trajanja naknadnog tlaka širina nakon 48 h se povećava, a opada porastom temperature medija za temperiranje pri kraćem vremenu trajanja naknadnog tlaka.



Slika 5.24. Prikaz ovisnosti širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.26 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.26. Pregled statističkih podataka o modelu – širina nakon 48 h, ABS

Standardno odstupanje	0,011
Aritmetička sredina	9,98
Koeficijent determiniranosti	0,8775

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja širine nakon 48 h:

$$y = 9,98 - 0,023 \cdot x_1 + 0,019 \cdot x_2 + 0,015 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.15)$$

Jednadžba za izračunavanje širine nakon 48 h sa stvarnim faktorima:

$$y = 10,09207 - 2,36544 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 0,026018 \cdot x_2 + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.16)$$

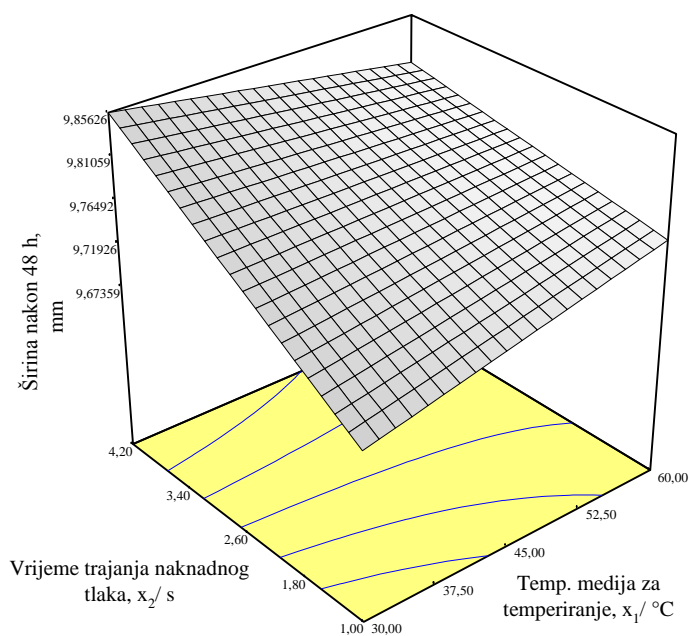
5.5.12. UTJECAJ NA ŠIRINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.27 prikazani su rezultati obrade utjecaja na širinu nakon 48 h za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.27. Rezultati analize varijance – širina nakon 48 h, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,033	3	0,011	101,53	< 0,0001
	x_1	$2,499 \cdot 10^{-4}$	1	$2,499 \cdot 10^{-4}$	2,33	0,1616
	x_2	0,28	1	0,028	264,96	< 0,0001
	$x_1 \cdot x_2$	$4,011 \cdot 10^{-3}$	1	$4,011 \cdot 10^{-3}$	37,32	0,0002
Ostatak		$9,674 \cdot 10^{-4}$	9	$1,075 \cdot 10^{-4}$		
	Odstupanje od modela	$9,540 \cdot 10^{-4}$	5	$1,908 \cdot 10^{-4}$	57,24	0,0008
	Pogreška	$1,333 \cdot 10^{-5}$	4	$3,333 \cdot 10^{-6}$		
Ukupno		0,034	12			

Slika 5.25 prikazuje ovisnost širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Iz slike se može zaključiti da širina nakon 48 h raste porastom vremena trajanja naknadnog tlaka pri nižoj temperaturi medija za temperiranje.



Slika 5.25. Prikaz ovisnosti širine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.28 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.28. Pregled statističkih podataka o modelu – širina nakon 48 h, PP

Standardno odstupanje	0,010
Aritmetička sredina	9,77
Koeficijent determiniranosti	0,9713

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja širine nakon 48 h:

$$y = 9,77 + 5,589 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,060 \cdot x_2 - 0,032 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.17)$$

Jednadžba za izračunavanje širine nakon 48 h sa stvarnim faktorima:

$$y = 9,50241 + 3,80317 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,09666 \cdot x_2 - 1,31944 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.18)$$

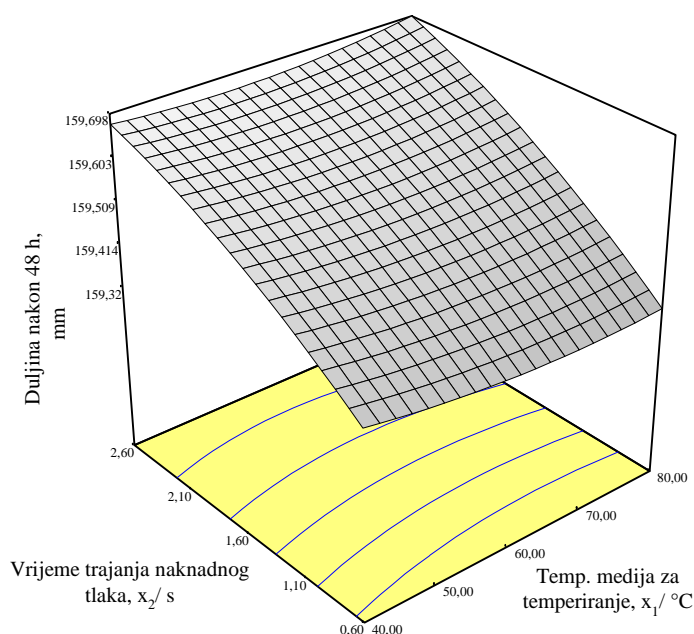
5.5.13. UTJECAJ NA DULJINU NAKON 48 h - ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA ABS

U tablici 5.29 prikazani su rezultati obrade utjecaja na duljinu nakon 48 h za materijal ABS u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.29. Rezultati analize varijance – duljina nakon 48 h, ABS

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0
Model		0,24	5	0,049	39,39	<0,0001
	x_1	$2,388 \cdot 10^{-4}$	1	$2,388 \cdot 10^{-4}$	0,19	0,6743
	x_2	0,023	1	0,023	158,77	<0,0001
	x_1^2	$3,216 \cdot 10^{-3}$	1	$3,216 \cdot 10^{-3}$	2,59	0,1517
	x_2^2	$7,807 \cdot 10^{-3}$	1	$7,807 \cdot 10^{-3}$	6,28	0,0406
	$x_1 \cdot x_2$	$1,111 \cdot 10^{-3}$	1	$1,111 \cdot 10^{-3}$	0,89	0,3758
Ostatak		$8,697 \cdot 10^{-3}$	7	$2,311 \cdot 10^{-3}$		
	Odstupanje od modela	$6,039 \cdot 10^{-3}$	3	$2,013 \cdot 10^{-3}$	3,03	0,1561
	Pogreška	$2,658 \cdot 10^{-3}$	4	$6,644 \cdot 10^{-4}$		
Ukupno		0,12	12			

Slika 5.26 prikazuje ovisnost duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a. Iz slike se može vidjeti da porastom vremena trajanja naknadnog tlaka raste duljina nakon 48 h, a da temperatura medija za temperiranje nema utjecaj na duljinu nakon 48 h.



Slika 5.26. Prikaz ovisnosti duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod ABS-a

U tablici 5.30 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.30. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina nakon 48 h, ABS

Standardno odstupanje	0,035
Aritmetička sredina	159,52
Koeficijent determiniranosti	0,9657

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja duljine nakon 48 h:

$$y = 159,53 - 5,464 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 + 0,17 \cdot x_2 + 0,022 \cdot x_1^2 - 0,034 \cdot x_2^2 + 0,017 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.19)$$

Jednadžba za izračunavanje duljine nakon 48 h sa stvarnim faktorima:

$$y = 159,46103 - 8,05651 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 0,22705 \cdot x_2 + 5,375 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 - 0,0335 \cdot x_2^2 + 8,333 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.20)$$

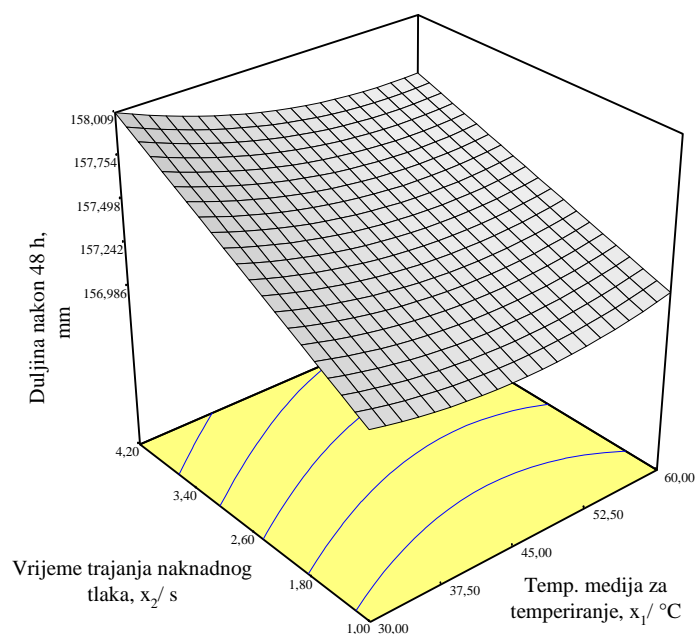
5.5.14. UTJECAJ NA DULJINU NAKON 48 h – ANALIZA REZULTATA POKUSA ZA PP

U tablici 5.31 prikazani su rezultati obrade utjecaja na duljinu nakon 48 h za materijal PP u programskom paketu *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Tablica 5.31. Rezultati analize varijance – duljina nakon 48 h, PP

		Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H₀
Model		1,26	5	0,025	72,68	<0,0001
	x₁	0,070	1	0,070	20,08	0,0029
	x₂	1,07	1	1,07	309,00	<0,0001
	x₁²	0,088	1	0,088	25,39	0,0015
	x₂²	4,36 · 10 ⁻⁶	1	4,36 · 10 ⁻⁶	1,258 · 10 ⁻³	0,9727
	x₁ · x₂	0,029	1	0,029	8,51	0,0224
Ostatak		0,024	7	3,464 · 10 ⁻³		
	Odstupanje od modela	0,022	3	7,294 · 10 ⁻³	12,32	0,0173
	Pogreška	2,369 · 10 ⁻³	4	5,922 · 10 ⁻⁴		
Ukupno		1,28	12			

Slika 5.27 prikazuje ovisnost duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a. Iz slike se može uočiti da porastom vremena trajanja naknadnog tlaka duljina nakon 48 h raste, te da porastom temperature medija za temperiranje duljina nakon 48 h lagano pada.



Slika 5.27. Prikaz ovisnosti duljine nakon 48 h o vremenu trajanja naknadnog tlaka i temperaturi medija za temperiranje kod PP-a

U tablici 5.32 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu.

Tablica 5.32. Pregled statističkih podataka o modelu – duljina nakon 48 h, PP

Standardno odstupanje	0,059
Aritmetička sredina	157,42
Koeficijent determiniranosti	0,9811

Kodirana jednadžba za izračunavanje predviđanja duljine nakon 48 h:

$$y = 157,35 - 0,093 \cdot x_1 + 0,37 \cdot x_2 + 0,11 \cdot x_1^2 + 7,917 \cdot 10^{-4} \cdot x_2^2 - 0,086 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.21)$$

Jednadžba za izračunavanje duljine nakon 48 h sa stvarnim faktorima:

$$y = 157,63244 - 0,041902 \cdot x_1 + 0,38796 \cdot x_2 + 4,99815 \cdot 10^{-4} \cdot x_1^2 + 3,09245 \cdot 10^{-4} \cdot x_2^2 - 3,57639 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.22)$$

5.6. RASPRAVA O DOBIVENIM REZULTATIMA

Pretpokusom je ustanovljeno da maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka kod ABS-a iznosi 2,6 s, te da pri njemu ispitno tijelo teži 8,9 g. Kod PP-a maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka iznosi 4,2 s i daje masu ispitnog tijela od 7,21 g. Takav rezultat bio je očekivan na temelju

različitih svojstva materijala. Nakon što je ustanovljeno maksimalno vrijeme trajanja naknadnog tlaka, odabran je interval trajanja pri kojem ono ima utjecaj na svojstva ispitnog tijela.

Pokus je imao dva promjenjiva parametra, vrijeme trajanja naknadnog tlaka i temperaturu medija za temperiranje. Mijenjajući ta dva parametra prema planu pokusa, te analizom dobivenih rezultata, doneseni su zaključci o utjecaju na masu, tvrdoću i dimenzije za oba materijala. Povećanjem vremena trajanja naknadnog tlaka raste većina svojstva kod oba materijala. Tek kod tvrdoće PP-a i kod duljine ABS-a vrijeme trajanja naknadnog tlaka nema utjecaj. Isto tako, zaključeno je da temperatura medija za temperiranje najčešće nema utjecaj na svojstva otpreska kod oba materijala. Uz iznimku, kod širine ABS-a i duljine nakon 48 h kod PP, povećanjem temperature medija za temperiranje zapaženo je lagano sniženje spomenutih svojstva.

6. ZAKLJUČAK

Veliki dio današnjeg tehnološkog napretka povezan je s razvojem i primjenom polimera. Polimerni materijali postali su neizostavan dio ljudskog života. Injekcijsko prešanje, kao jedan od najvažnijih postupaka preradbe polimera, je visoko automatiziran, dinamičan, nelinearan proces s mnogo parametara. Gotovo svi parametri mogu mijenjati svojstva otpreska. Kako bi se mogla dobiti željena kvaliteta i svojstva otpreska potrebno je znati kako ti parametri utječu na otpresak. S tim saznanjima parametri se mogu regulirati na optimalnu razinu.

U okviru rada opsežno je opisan proces injekcijskog prešanja. Navedeno je od čega se sve sastoji linija za injekcijsko prešanje te su opisane potrebe sustava za injekcijsko prešanje plastomernih taljevina. Također, obrađeni su svi važniji parametri injekcijskog prešanja te je opisano kako ti parametri u teoriji utječu na svojstva otpreska, pogotovo na ona mehanička. Objašnjeni su postupci ispitivanja otpresaka za određeno svojstvo, bilo to kratkotrajnim ili dugotrajnim ispitivanjem.

U esperimentalnom dijelu proučen je utjecaj vremena trajanja naknadnog tlaka i temperature medija za temperiranje na masu, tvrdoću i dimenzije jednog amorfnog te jednog kristalastog polimera. Za amorfni polimer odabran je ABS, a za kristalasti PP. Prema planu pokusa i pretpokusa izrađenim pomoću programskog paketa *Design Expert* injekcijski su prešana ispitna tijela prema ISO normama. Rezultati pretpokusa i pokusa također su obrađeni i analizirani s pomoću spomenutog programskog paketa. Prvo je proveden pretpokus s ciljem određivanja maksimalnog vremena trajanja naknadnog tlaka, odnosno vremena djelovanja naknadnog tlaka nakon kojeg više nema utjecaja na svojstva otpreska. To je vrijeme određeno mjerenjem mase ispitnih tijela. Vrijeme trajanja naknadnog tlaka kada se masa ustalila je maksimalno vrijeme naknadnog tlaka. Kada je dobiven vremenski interval utjecaja naknadnog tlaka započet je pokus. Mijenajući dva parametra, vrijeme trajanja naknadnog tlaka i temperaturu medija za temperiranje, injekcijski su prešana ispitna tijela. Odmah nakon injekcijskog prešanja izmjerene su duljina, širina, masa i tvrdoća. Nakon 48 h ponovljena su mjerenja duljine i širine. Analizom rezultata pokusa možemo zaključiti da duže vrijeme trajanja naknadnog tlaka povećava sva promatrana svojstva ispitnih tijela, te da temperatura medija za temperiranje većinom nema utjecaja.

7. LITERATURA

- [1] Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
- [2] Rogić, A., Čatić, I., Godec, D.: *Polimeri i polimerne tvorevine*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2008.
- [3] Šercer, M., Čatić, I.: *Vođenje procesa injekcijskog prešanja plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1986.
- [4] Šercer, M.: *Reguliranje procesa injekcijskog prešanja od ciklusa do ciklusa*, Magistarski rad, Tehnološki fakultet, Zagreb, 1984.
- [5] Čatić, I.: *Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
- [6] Garvey, E.B.: *On-line Quality Control of Injection Molding Using Neural Networks*, M.Sc. Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, 1997.
- [7] Gao, F., Koresawa, H., Narahara, H., Suzuki, H.: *Evaluation of thermal environment in plastic injection mold*, ANTEC 2001, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 6.-10.5.2001., 969-973.
- [8] Johannaber, F.: *Injection Molding Machines*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
- [9] Brown, R.: *Handbook of Polymer Testing, Short-Term Mechanical Tests*, Rapra Technology Limited, United Kingdom, 2002.
- [10] Pötsch, G., Michaeli, W.: *Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [11] Raos, P., Čatić, I.: *Razvoj injekcijski prešanih polimernih tvorevina*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1991.
- [12] Collins, C.: *Monitoring cavity pressure perfects injection molding*, Assembly Automation, 19(1999)3, 197-202.
- [13] ISO 527 – 2: 1993.
- [14] www.nomis.hr/admin/_upload/_files/TerluranHH106.pdf, 28.01.2013.
- [15] www.nomis.hr/admin/_upload/_files/BC250MO.pdf, 29.01.2013.
- [16] www.danzaplast.com/injection%20moulding%20machines/Arbrug%20320%20D%20-850%20-%20210%20-%2090%20146085.htm, 04.02.2013.
- [17] Šakić, N.: *Metode znanstveno-istraživačkog rada*, predavanja na poslijediplomskom studiju, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [18] Rujnić-Sokele, M.: *Optimiranje procesa proizvodnje puhanih proizvoda od poli(etilentereftalata)*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [19] N.N.: *Prospektni materijal tvrtke Metalka*, 1988.

- [20] Del Vecchio, R.J.: *Understanding Design of Experiments*, Carl Hanser Verlag, München, 1997.
- [21] Rujnić-Sokele, M.: *Utjecaj parametara razvlačenja puhanja na svojstva PET boca*, Polimeri 28(2007)4; 225-233.

8. PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tablica 8.1. Rezultati pretpokusa za ABS

Vrijeme trajanja naknadnog tlaka, s	Masa, g
0,2	8,54
0,4	8,56
0,6	8,57
0,8	8,59
1,0	8,62
1,2	8,65
1,4	8,67
1,6	8,69
1,8	8,74
2,0	8,77
2,2	8,83
2,4	8,88
2,6	8,90
2,8	8,90
3,0	8,90
3,2	8,90
3,4	8,90

III. Tablica 8.2. Rezultati pretpokusa za PP

Vrijeme trajanja naknadnog tlaka, s	Masa, g
0,2	6,76
0,4	6,79
0,6	6,81
0,8	6,84
1,0	6,87
1,2	6,89
1,4	6,90
1,6	6,91
1,8	6,94
2,0	6,96
2,2	6,97
2,4	6,99
2,6	7,00
2,8	7,02
3,0	7,04
3,2	7,07
3,4	7,09
3,6	7,14
3,8	7,18
4,0	7,20
4,2	7,21
4,4	7,21
4,6	7,21
4,8	7,21
5,0	7,21

IV. Tablica 8.3. Vrijednosti dobivene pokusom za materijal ABS

Stanje	Redoslijed izvođenja	Temperatura medija za temperiranje, °C	Vrijeme trajanja naknadnog tlaka, s	Masa, g	Širina, mm	Duljina, mm	Širina nakon 48 h, mm	Duljina nakon 48 h, mm	Tvrdoća, Shore D
9.1.	1	60,0	1,6	8,69	10,04	160,10	9,99	159,57	79
9.2.	2	60,0	1,6	8,68	10,05	160,10	10,00	159,64	74
9.3.	3	60,0	1,6	8,68	10,05	160,10	9,99	159,48	76
2.1.	4	80,0	0,6	8,56	9,98	160,38	9,93	159,26	74
2.2.	5	80,0	0,6	8,56	9,96	160,43	9,90	159,38	72
2.3.	6	80,0	0,6	8,56	9,98	160,35	9,94	159,45	78
4.1.	7	80,0	2,6	8,86	10,04	160,20	10,01	159,64	78
4.2.	8	80,0	2,6	8,85	10,04	160,25	10,00	159,83	78
4.3.	9	80,0	2,6	8,85	10,04	160,15	10,00	159,74	76
10.1.	10	60,0	1,6	8,68	10,05	160,15	9,99	159,52	78
10.2.	11	60,0	1,6	8,68	10,00	160,35	9,97	159,52	82
10.3.	12	60,0	1,6	8,69	10,00	160,50	9,99	159,48	80
8.1.	13	60,0	3,0	8,86	10,05	160,30	10,01	159,73	78
8.2.	14	60,0	3,0	8,87	10,05	160,25	10,00	159,66	80
8.3.	15	60,0	3,0	8,87	10,04	160,20	10,01	159,66	84
11.1.	16	60,0	1,6	8,68	10,00	160,50	9,96	159,55	76
11.2.	17	60,0	1,6	8,68	10,01	160,52	9,97	159,47	68
11.3.	18	60,0	1,6	8,68	10,02	160,50	9,97	159,58	70
13.1.	19	60,0	1,6	8,68	10,01	160,54	9,97	159,57	81
13.2.	20	60,0	1,6	8,68	10,02	160,54	9,98	159,51	83
13.3.	21	60,0	1,6	8,68	10,02	160,56	9,98	159,54	80
12.1.	22	60,0	1,6	8,68	10,01	160,56	9,98	159,53	78
12.2.	23	60,0	1,6	8,68	10,01	160,48	9,97	159,46	75
12.3.	24	60,0	1,6	8,67	10,01	160,48	9,96	159,51	76
5.1.	25	31,7	1,6	8,78	10,05	160,35	10,02	159,58	82
5.2.	26	31,7	1,6	8,77	10,05	160,26	10,02	159,61	80
5.3.	27	31,7	1,6	8,77	10,05	160,28	10,01	159,58	78
3.1.	28	40,0	2,6	8,88	10,05	160,57	10,01	159,67	84
3.2.	29	40,0	2,6	8,88	10,05	160,55	10,01	159,67	81
3.3.	30	40,0	2,6	8,87	10,04	160,50	10,01	159,68	76
1.1.	31	40,0	0,6	8,58	10,03	160,40	9,99	159,40	76
1.2.	32	40,0	0,6	8,58	10,03	160,38	9,99	159,34	72
1.3.	33	40,0	0,6	8,58	10,02	160,40	9,99	159,36	80
7.1.	34	60,0	0,2	8,49	10,02	160,25	9,97	159,11	77
7.2.	35	60,0	0,2	8,49	10,01	160,20	9,97	159,34	76
7.3.	36	60,0	0,2	8,49	10,02	160,25	9,97	159,16	80
6.1.	37	88,3	1,6	8,67	9,99	160,55	9,95	159,52	82
6.2.	38	88,3	1,6	8,66	9,98	160,53	9,93	159,45	79
6.3.	39	88,3	1,6	8,66	9,99	160,56	9,93	159,58	80

V. Tablica 8.4. Vrijednosti dobivene pokusom za materijal PP

Stanje	Redoslijed izvođenja	Temperatura medija za temperiranje, °C	Vrijeme trajanja naknadnog tlaka, s	Masa, g	Širina, mm	Duljina, mm	Širina nakon 48 h, mm	Duljina nakon 48 h, mm	Tvrdoća, Shore D
3.1.	1	30,0	4,2	7,25	9,94	159,53	9,85	157,97	65
3.2.	2	30,0	4,2	7,26	9,94	159,53	9,85	158,09	67
3.3.	3	30,0	4,2	7,26	9,94	159,52	9,85	158,06	66
10.1.	4	45,0	2,6	6,95	9,90	159,27	9,77	157,33	65
10.2.	5	45,0	2,6	6,95	9,89	159,30	9,77	157,44	66
10.3.	6	45,0	2,6	6,95	9,90	159,38	9,78	157,37	67
9.1.	7	45,0	2,6	6,95	9,89	159,38	9,77	157,37	66
9.2.	8	45,0	2,6	6,94	9,90	159,38	9,77	157,37	64
9.3.	9	45,0	2,6	6,95	9,88	159,20	9,77	157,38	68
11.1.	10	45,0	2,6	6,94	9,88	159,15	9,78	157,33	65
11.2.	11	45,0	2,6	6,94	9,88	159,23	9,77	157,32	65
11.3.	12	45,0	2,6	6,94	9,87	159,17	9,77	157,38	68
13.1.	13	45,0	2,6	6,94	9,86	159,35	9,77	157,31	66
13.2.	14	45,0	2,6	6,94	9,89	159,33	9,78	157,37	66
13.3.	15	45,0	2,6	6,94	9,89	159,26	9,77	157,33	67
6.1.	16	66,2	2,6	6,96	9,88	159,45	9,77	157,54	70
6.2.	17	66,2	2,6	6,96	9,88	159,20	9,77	157,47	68
6.3.	18	66,2	2,6	6,95	9,89	159,20	9,78	157,46	67
8.1.	19	45,0	4,9	7,26	9,94	159,55	9,85	157,90	67
8.2.	20	45,0	4,9	7,26	9,94	159,50	9,85	157,88	66
8.3.	21	45,0	4,9	7,25	9,94	159,60	9,85	157,90	64
7.1.	22	45,0	0,3	6,71	9,78	159,43	9,66	156,78	67
7.2.	23	45,0	0,3	6,71	9,81	159,45	9,67	156,82	65
7.3.	24	45,0	0,3	6,71	9,78	159,38	9,66	156,75	67
5.1.	25	23,8	2,6	6,99	9,88	159,37	9,77	157,69	64
5.2.	26	23,8	2,6	6,99	9,88	159,33	9,77	157,68	68
5.3.	27	23,8	2,6	6,99	9,85	159,30	9,77	157,53	66
2.1.	28	60,0	1,0	6,81	9,84	159,45	9,77	157,16	65
2.2.	29	60,0	1,0	6,80	9,87	159,35	9,75	157,04	65
2.3.	30	60,0	1,0	6,80	9,83	159,30	9,77	157,07	67
4.1.	31	60,0	4,2	6,80	9,83	159,30	9,75	157,13	67
4.2.	32	60,0	4,2	7,25	9,94	159,40	9,84	157,88	67
4.3.	33	60,0	4,2	7,14	9,93	159,40	9,83	157,78	66
12.1.	34	45,0	2,6	6,94	9,88	159,35	9,77	157,32	67
12.2.	35	45,0	2,6	6,94	9,89	159,33	9,77	157,34	67
12.3.	36	45,0	2,6	6,94	9,90	159,30	9,77	157,31	65
1.1.	37	30,0	1,0	6,82	9,77	159,13	9,68	157,27	65
1.2.	38	30,0	1,0	6,82	9,74	159,33	9,68	157,08	64
1.3.	39	30,0	1,0	6,82	9,76	159,33	9,68	157,22	65